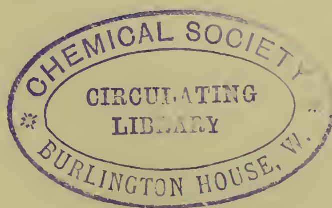

22102147020

TRAITÉ PRATIQUE

D'ÉLECTRICITÉ



Imprimeries réunies, B.

TRAITÉ PRATIQUE
D'ÉLECTRICITÉ

COMPRENANT LES APPLICATIONS

AUX SCIENCES ET A L'INDUSTRIE

ET NOTAMMENT

A LA PHYSIOLOGIE, A LA MÉDECINE, A LA TÉLÉGRAPHIE
A L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE, A LA GALVANOPLASTIE, A LA MÉTÉOROLOGIE, ETC., ETC.

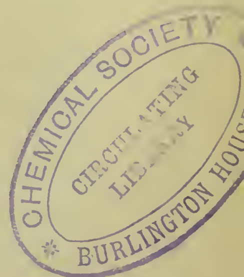
PAR

C. M. GARIEL

Membre de l'Académie de médecine, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées
Agrégé de physique à la Faculté de Médecine de Paris
Professeur de physique et de chimie à l'École nationale des Ponts et Chaussées

TOME PREMIER

Avec 253 figures dans le texte



PARIS
OCTAVE DOIN, ÉDITEUR
8, PLACE DE L'ODÉON, 8
1884

PRÉFACE

L'électricité dont l'étude avait été jusqu'à présent l'objet de recherches de laboratoire et dont les applications étaient réduites presque exclusivement à la télégraphie et à la galvanoplastie, l'électricité entre maintenant dans une nouvelle période, celle de l'utilisation industrielle. L'Exposition internationale d'électricité n'a pas fait naître cette situation, elle l'a seulement manifestée, elle l'a consacrée, et c'est parce qu'elle répondait à des besoins réels que son succès a été si grand. Il faut reconnaître, cependant, que cette Exposition et le Congrès qui en a été l'auxiliaire naturel n'auront pas été sans apporter un puissant concours à cette application d'une science dont les origines sont toutes récentes. L'attention des ingénieurs, des industriels, l'attention du grand public même a été mise en éveil par les merveilleux résultats que l'on y pouvait étudier et, par là, de nouveaux progrès ont été accomplis.

En présence des résultats déjà acquis, de ceux qui sont en voie de réalisation et de ceux qu'il est permis d'entrevoir comme prochains, beaucoup se sont trouvés déroutés. Les données classiques qui figuraient seules encore sur les programmes officiels de l'enseignement des dernières années sont insuffisantes, nous ne dirons pas pour permettre une étude complète des applications nouvelles de l'électricité, mais même pour saisir les principes sur lesquels elles reposent. Certes des publications spéciales ont été créées, dont la plupart ont une valeur réelle; nous ne croyons pas cependant qu'elles répondent à tous les besoins. Les unes s'adressent à un public restreint, aux savants, aux ingénieurs aux industriels qui sont déjà au courant de toutes ces questions soit d'une manière générale, soit sur une partie restreinte de l'électricité; les autres, sont des ouvrages de vulgarisation, d'une lecture facile, cherchant plutôt à inté-

resser qu'à instruire et qui, si elles s'adressent à un nombre plus considérable de lecteurs, ne font pas connaître, ne peuvent pas faire connaître les données plus techniques des problèmes qui se sont posés, de ceux qui se posent journellement. Nous avons pensé qu'il y avait place pour un traité spécial entre ces deux genres d'ouvrages; nous avons cru qu'il y a un public intelligent, avide de s'instruire, possédant des connaissances générales qu'il est susceptible d'appliquer, désireux de se rendre compte de ce que l'on peut obtenir, de ce que l'on peut espérer du nouvel agent; pour ce public, composé d'ingénieurs attachés aux industries ou aux services les plus variés, d'architectes, de médecins, de physiologistes, d'industriels, les ouvrages spéciaux donnent trop de détails, et supposent connus des faits et des principes qui, jusqu'à présent, ne font pas partie de l'éducation générale; par contre, les ouvrages de vulgarisation paraissent insuffisants et ne permettent pas de se former une idée nette des méthodes générales, des ressemblances ou des différences entre divers systèmes.

C'est pour ce public que nous avons écrit spécialement le *Traité des applications de l'électricité*; sans nous dissimuler les difficultés que cette publication présentait, nous avons cherché à satisfaire à un programme qui est compris implicitement dans les lignes qui précèdent.

Nous avons pensé qu'il convenait de commencer par rappeler les principes généraux sans la connaissance exacte desquels, il est impossible d'avoir une notion nette des applications : nous avons donc dû commencer par un exposé théorique. Mais comme nous n'avions pas à enseigner les faits principaux, mais seulement à les rappeler, nous avons pu être très bref sur les appareils classiques, sur les expériences élémentaires qui sont relatées avec détail dans tous les traités de Physique. Aussi cette partie théorique est-elle courte : nous avons, en revanche, beaucoup insisté sur les idées nouvelles, sur celles au moins qui sont indispensables, tout en nous efforçant de les traiter surtout au point de vue vraiment physique. Nous savons l'avantage

que présente, toutes les fois que l'on peut y avoir recours, l'application des mathématiques; mais nous savons aussi que, trop souvent, leur introduction masque complètement le phénomène même; le fait est vrai notamment pour l'électricité qui peut fournir de nombreux énoncés de problèmes aux mathématiciens; mais il ne faut pas que, dans un ouvrage de physique appliquée, les faits disparaissent derrière les équations. Nous espérons avoir apporté toute la rigueur possible dans nos déductions; les calculs y sont rares cependant, et sauf sur quelques points essentiels, ils sont rejetés en note et peuvent être passés sans inconvénient réel.

Comme ce *traité d'Électricité* n'est pas destiné spécialement à préparer à des examens, nous avons pu rompre avec quelques traditions qui sont entretenues soigneusement encore par les programmes officiels. C'est ainsi que notamment nous avons traité tout d'abord le magnétisme, ne voulant pas séparer l'électricité statique de l'électricité dynamique; dans la presque totalité des traités de physique, et même dans les ouvrages où l'on s'occupe plus spécialement d'électricité, le magnétisme est intercalé entre les deux parties de l'électricité, de telle sorte que l'on arrive difficilement à se rendre compte des liaisons intimes qui existent entre les phénomènes statiques et les effets dynamiques.

Nous avons renoncé absolument à la théorie des deux fluides: en réalité elle n'est jamais utilisée dans l'électricité dynamique, quoique l'on s'abstienne de le dire nettement, de telle sorte qu'il y a en réalité deux hypothèses distinctes : la théorie de Franklin, légèrement modifiée, satisfait à tous les besoins de l'électricité statique aussi bien qu'elle le fait naturellement pour l'électricité dynamique. Nous l'avons adoptée dès le début.

En ce qui concerne les applications mêmes, nous ne pouvions songer à donner le détail de tous les appareils qui ont été imaginés et nous avons dû nous imposer des limites rigoureuses. Dans chaque catégorie, pour chaque principe, nous avons décrit un seul appareil, celui que nous croyons devoir répondre le

mieux aux besoins en vue desquels il a été imaginé, à moins que plusieurs ne soient entrés effectivement déjà dans la pratique et qu'il y eût nécessité à les faire connaître.

Dans cette partie des applications, nous avons fait rentrer d'ailleurs la description de quelques instruments qui eussent pû être traités dans la partie théorique, mais qui à cause de leur nouveauté exigent plus de développements que n'en comporte cette partie. Pour la même raison, nous avons rejeté également dans la deuxième partie l'indication détaillée des divers systèmes de piles, ainsi que les méthodes pratiques de mesure.

Les méthodes de mesure dans lesquelles, comme il est juste, les questions théoriques ont une importance capitale et qui peuvent être considérées comme intermédiaires entre la théorie et la pratique, servent de début à la seconde partie, puis viennent ensuite la description des appareils et machines propres à rompre l'équilibre électrique, machines électriques, piles machines d'induction, etc., et enfin les applications proprement dites du magnétisme et de l'électricité que nous classons d'une manière générale ainsi qu'il suit :

Application du magnétisme.

Applications de l'électricité statique, électricité atmosphérique.

Application des courants : 1° appareils dans lesquels ceux-ci agissent surtout en vertu de la rapidité de leur transmission ; — 2° appareil dans lesquels les courants agissent comme transmetteurs d'énergie en donnant naissance à des effets physiologiques, à des effets calorifiques et lumineux, à des effets chimiques, à des effets mécaniques.

Le champ est vaste, on le voit, et les questions intéressantes : nous nous efforcerons de ne pas rester au-dessous de la tâche que nous avons entreprise.

C. M. GARIEL.

Paris, mai 1882.

TRAITÉ PRATIQUE

D'ÉLECTRICITÉ

MAGNÉTISME

1. Aimants. — Corps magnétiques. — Certains corps jouissent de la propriété signalée depuis longtemps d'attirer la limaille de fer : ces corps sont désignés sous le nom d'*aimants*. Ce sont tantôt des fragments de roches, *pierres d'aimant*, dont la composition est celle de l'oxyde de fer Fe^3O^4, tantôt des morceaux d'acier auxquels on donne la forme jugée la plus convenable pour les expériences et auxquels on a communiqué la *propriété magnétique* par certaines opérations que nous signalerons ultérieurement : d'où la distinction entre les *aimants naturels* et les *aimants artificiels*.

On peut facilement mettre en évidence la propriété *magnétique* dont nous parlons, soit en plongeant l'aimant dans la limaille de fer qui s'attache au barreau en forme de houppes plus ou moins touffues (fig. 1), soit en approchant ce barreau d'un *pendule magnétique* constitué par une petite masse de fer suspendue à l'extrémité d'un fil flexible qui se trouve dévié de la verticale par suite de l'attraction qui se produit, et qui peut être telle que la masse de fer vienne s'attacher à l'aimant, en quelque sorte. On a même une première idée de la grandeur de l'action d'après la quantité de limaille soulevée ou d'après la déviation subie par le pendule électrique.

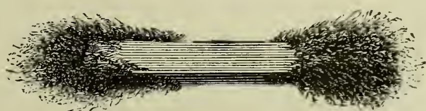


Fig. 1.

Les barreaux aimantés que l'on emploie peuvent avoir des formes diverses : tantôt ce sont des parallélipipèdes allongés, des lames

minces rectangulaires; tantôt celles-ci sont taillées en forme de losange dont une diagonale, appelée *axe*, est très grande par rapport à l'autre : on a alors une *aiguille aimantée*. Dans d'autres cas, le barreau de largeur uniforme est recourbé en demi-cercle ou, plus souvent, en fer à cheval; enfin on peut également employer des cercles aimantés dans lesquels les pôles sont aux extrémités d'un même diamètre.

Si le fer est le corps sur lequel les aimants exercent leur action le plus énergiquement et est, pour cette raison, spécialement indiqué, il ne faudrait pas croire qu'il est la seule substance qui puisse être ainsi attirée; on peut dire, d'une manière générale, qu'un aimant agit sur tous les corps, mais avec une énergie très différente et même de manière opposée, comme nous le dirons plus loin (voyez ci-après *Magnétisme* et *Diamagnétisme* des corps); il en est très peu cependant pour lesquels l'action soit facilement appréciable. Ce sont principalement, avec le fer, le nickel et le cobalt qui sont attirés par les aimants : ces corps ont été appelés pour cette raison, *corps magnétiques*.

Nous ne nous occuperons que du fer dans ce qui va suivre, sauf indication contraire formelle.

2. Poles. — Ligne neutre. — On observe, d'autre part, que pour une même distance, la propriété attractive n'est pas uniformément distribuée dans un aimant, et qu'elle est principalement localisée en un nombre déterminé de régions, nombre qui n'est jamais inférieur à deux. On peut vérifier ce fait en approchant d'un pendule magnétique les différents points d'un barreau aimanté : on reconnaîtra que, en général, l'attraction atteint une valeur maxima vers les extrémités et diminue à mesure que l'on se rapproche du milieu du barreau où la force attractive est nulle. On désigne sous le nom de *pôles* les parties où l'action est énergique et sous le nom de *zone neutre* ou *ligne neutre* la région où elle est nulle : nous aurons d'ailleurs ultérieurement à donner des définitions plus précises de ces expressions (33). Dans le cas où il existe plus de deux régions actives, on réserve le nom de pôles à celles qui sont situées aux extrémités de l'aimant ou du barreau aimanté et on appelle les autres des *points conséquents :* chaque point conséquent qui se manifeste entraîne nécessairement l'existence d'une zone neutre supplémentaire.

Il semble que l'on puisse considérer un aimant circulaire comme analogue à l'ensemble de deux barreaux aimantés réunis par leurs pôles de même nom; il existe alors deux lignes neutres sur le diamètre perpendiculaire à la ligne des pôles.

On met nettement ces diverses régions en évidence, de manière à les observer simultanément, à l'aide de l'expérience du *fantôme magnétique* ou *spectre magnétique*. Un barreau aimanté (fig. 2) est placé sous une feuille de carton ou de papier fort, et l'on y projette de la limaille fine de fer à l'aide d'un tamis placé à une certaine hauteur. Dans leur chute, les particules de métal subissent l'attraction de l'aimant et se réunissent en masses d'autant plus serrées qu'on se rapproche davantage des pôles : on peut aider d'ailleurs à

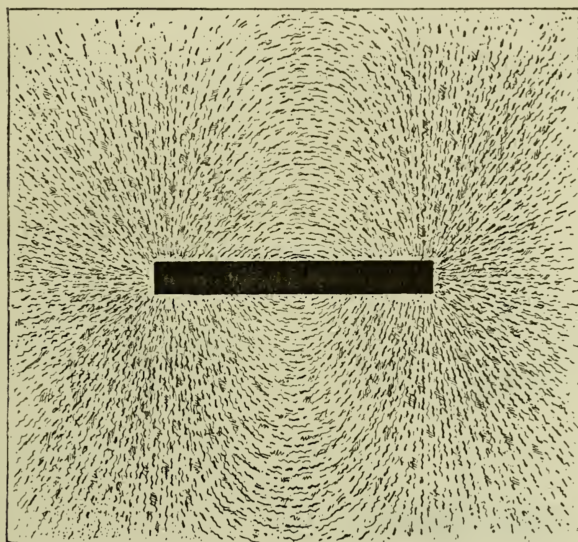


Fig. 2.

la formation de ces figures en communiquant des secousses cadencées à la feuille interposée.

Si, avant de projeter la limaille, on a eu soin d'enduire la feuille d'une légère couche d'une matière adhésive, comme une solution de gomme, on pourra conserver le spectre obtenu.

On peut également opérer avec une lame de verre recouverte préalablement d'une couche de gomme que l'on a laissée sécher, ce qui permet d'obtenir plus facilement des figures satisfaisantes; en soumettant ensuite cette lame à l'action de la vapeur d'eau, on peut fixer la limaille comme dans le cas précédent. On peut, après dessication, se servir de cette lame pour montrer en projection le fantôme magnétique obtenu.

3. — Comme on le voit d'après les expériences précédentes, l'ac-

tion magnétique se manifeste à distance, et ce n'est pas là un des caractères les moins curieux de ces phénomènes que nous allons étudier et dont nous ne chercherons pas d'ailleurs en ce moment à donner une explication.

Cette action se manifeste également à travers les corps, au moins à travers les corps non magnétiques : les mêmes expériences déjà signalées montrent qu'en effet, la présence de l'air n'y met pas obstacle. On reconnaît d'ailleurs que les attractions se font également sentir à travers une feuille de papier, de carton, à travers une lame de verre, une planche, etc., au moins tant que leur épaisseur n'est pas trop grande.

Le phénomène est plus complexe dans le cas d'un corps magnétique interposé et nous y reviendrons ultérieurement.

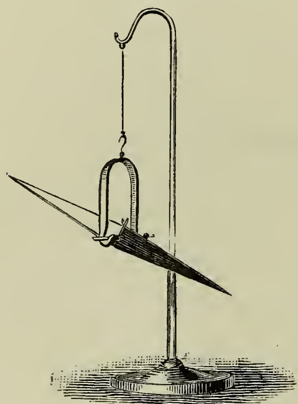


Fig. 3.

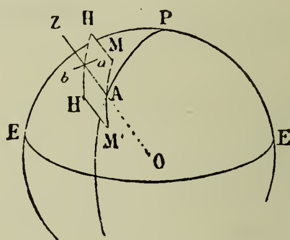


Fig. 4.

Dans ces diverses expériences, surtout dans le cas où l'on emploie le pendule magnétique, il est facile de reconnaître que les attractions observées dépendent, toutes choses égales d'ailleurs, de la distance de l'aimant au corps attiré, la force attractive diminuant rapidement lorsque cette distance augmente. Nous indiquerons plus loin les procédés que l'on a employés pour déterminer la loi de variation.

4. Direction spontanée des aimants libres. — Considérons un barreau d'acier de forme prismatique ou une aiguille à l'état naturel ; s'il est suspendu de manière à pouvoir tourner autour de son centre de gravité (fig. 3), il sera en état d'équilibre indifférent, conservant toutes les positions qu'on voudra lui donner. Mais si l'on vient à aimanter le barreau, on observera que, après cette opération, il aura une position d'équilibre stable à laquelle il reviendra lorsqu'on l'en

aura écarté. Pour déterminer cette position, on se donne (fig. 4) le plan vertical HMH'M' qui contient l'axe *ab* du barreau, plan que l'on nomme *méridien magnétique*, d'une part; et, d'autre part, l'angle que dans ce plan l'axe *ab* fait avec l'horizontale HH' : cet angle est appelé *angle d'inclinaison* ou simplement *inclinaison* et l'aiguille ainsi suspendue est dite *aiguille d'inclinaison*.

On reconnaît facilement que la direction du méridien magnétique s'écarte peu de celle du méridien géographique du lieu où l'on se trouve. D'autre part, l'extrémité du barreau aimanté qui est au-dessous de l'horizontale est dirigée du côté du pôle terrestre le plus voisin, du côté du pôle nord dans notre hémisphère, par conséquent. Pour cette raison, cette extrémité est désignée sous le nom de *pôle nord* du barreau aimanté, l'autre est appelée *pôle sud*. Il faut savoir que, pour des raisons que nous expliquerons ultérieurement, le pôle nord est souvent dénommé *pôle austral* et le pôle sud, *pôle boréal*.

Il est bien entendu que, sauf des circonstances exceptionnelles auxquelles serait soumis un barreau aimanté et qui modifieraient profondément ses propriétés magnétiques, c'est toujours la même extrémité qui se dirige vers le nord. Dans les barreaux aimantés, il est signalé par une marque spéciale, la lettre N par exemple, ou bien cette extrémité est colorée en bleu ou en noir. Dans quelques pays, on met un point sur ce pôle, qu'on appelle en conséquence le *pôle marqué*.

5. Attractions et répulsions réciproques des pôles des aimants. — Soient deux barreaux A et B dont on a préalablement déterminé les deux pôles; suspendons l'un d'eux A par son centre de gravité et approchons alors successivement de ses deux extrémités les deux extrémités de B. Nous observerons que, tandis que si nous avions approché un morceau de fer doux dans les mêmes conditions, il y aurait eu constamment attraction, il y aura alors tantôt attraction, et tantôt répulsion. Ainsi

Le pôle nord de B attirera	le pôle sud de A,
et repoussera	son pôle nord;
Le pôle sud de B repoussera	le pôle sud de A,
et attirera	son pôle nord.

Il y aura d'ailleurs réciprocité, et on observerait les mêmes actions si on approchait le barreau A du barreau B préalablement suspendu.

On peut résumer les faits précédents par la formule suivante :

Les pôles de noms contraires s'attirent et les pôles de même nom se repoussent.

Il sera d'ailleurs facile de reconnaître que ces actions, attractions ou répulsions, varient avec la distance, diminuant lorsque celle-ci augmente.

6. Rupture d'un barreau aimanté. — Lorsque l'on vient à rompre un barreau aimanté présentant deux pôles, les deux fragments sont chacun un aimant complet présentant deux pôles; les pôles primitifs subsistent et deux pôles opposés sont apparus après la rupture aux extrémités qui, primitivement, occupaient la zone neutre (fig. 5).

Bien entendu, chaque fragment étant un aimant complet peut donner lieu au même phénomène et se subdiviser en deux autres aimants présentant leurs pôles orientés toujours dans le même sens.

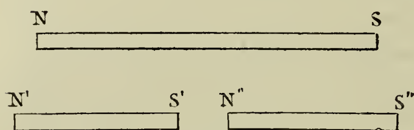


Fig. 5.

7. Aimantation par influence. — Un barreau de fer doux placé dans le voisinage d'un aimant présente des signes d'aimantation qui peuvent se mettre en évidence soit par les attractions et répulsions qu'il produit, soit par la production de fantômes magnétiques. L'effet est particulièrement intense lorsque le barreau de fer doux est dans le prolongement de l'aimant (fig. 6) : il constitue alors un aimant qui est orienté comme l'aimant lui-même, les pôles de noms contraires étant en regard. Mais on n'obtient ainsi qu'une aimantation temporaire, et le fer doux perd ses propriétés magnétiques lorsqu'on l'éloigne du barreau aimanté, pour les reprendre si on l'en rapproche.

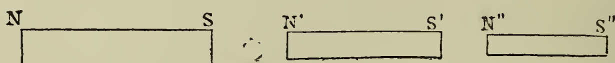


Fig. 6.

L'intensité de cette aimantation dite par influence varie avec la distance, augmentant lorsque celle-ci diminue.

On peut faire l'expérience en plaçant à la suite plusieurs morceaux de fer doux qui, tous, prennent une aimantation de même sens, mais d'autant plus faible qu'on considère un point plus éloigné de l'aimant influent.

Si l'on répète ces expériences avec des morceaux d'acier, au lieu de fer doux, on observera des effets analogues, mais plus faibles.

Par contre, ils subsisteront au moins en partie, malgré l'éloignement du barreau influent.

On exprime cette différence entre le fer et l'acier en disant que l'acier possède une *force coercitive* qui n'appartient pas au fer, sans d'ailleurs attacher une signification théorique à cette expression. En parlant d'aciers de natures différentes et qui conservent plus ou moins facilement l'aimantation qu'ils ont reçue, on dit qu'il ont des forces coercitives inégales.

8. Magnétisme rémanent. — En réalité, il n'y a pas de fer doux qui perde absolument les propriétés magnétiques qu'il a reçues par influence : il en conserve toujours une certaine partie, mais d'autant moins que le fer est plus doux. De telle sorte qu'un morceau de fer doux qui a été dans le voisinage d'un aimant ou qui, seulement, a été placé parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, conserve une polarité et est un aimant déterminé, bien que très faible. En un mot, il n'y a pas de fer doux qui ne possède une certaine force coercitive. On dit d'un morceau de fer qui s'est trouvé dans ces conditions qu'il possède du *magnétisme rémanent.*

Le magnétisme rémanent doit entrer en ligne de compte dans l'explication de divers appareils et peut constituer, suivant les cas, soit un inconvénient, soit un avantage.

9. Aimantation par frottement. — Lorsque, se plaçant dans des conditions convenables, on vient à frotter un morceau d'acier avec un ou plusieurs aimants, on communique les propriétés magnétiques au barreau d'acier; on dit alors qu'on l'a aimanté. Il existe d'ailleurs des méthodes indirectes d'aimanter un barreau d'acier.

Quel que soit le procédé d'aimantation que l'on emploie, on peut obtenir des points conséquents; mais on cherche, en général, à éviter ce résultat et, sauf pour quelques expériences spéciales, on rejette les barreaux qui présentent plus de deux centres d'attraction.

Ajoutons, mais sans insister, que tout barreau d'acier qui a été placé parallèlement à l'aiguille d'inclinaison a pris après un certain temps une aimantation qu'il conserve ensuite, malgré son déplacement. L'action est plus énergique si, pendant qu'il était dans cette position, le morceau d'acier a été soumis à des actions mécaniques d'une certaine énergie, telles que choc, torsion, vibration. C'est ce qui explique que la plupart des outils d'acier sont plus ou moins aimantés.

Cette aimantation est attribuée à l'action magnétique de la terre, comme nous l'expliquerons plus loin.

10. Hypothèse des fluides magnétiques. — Bien qu'il n'y ait pas lieu d'attacher un grand intérêt aux théories qui ont été données du magnétisme considéré comme constituant un phénomène spécial, puisque nous dirons ultérieurement que les faits que nous avons signalés peuvent être rattachés à ceux qui seront étudiés dans l'électricité dynamique, nous croyons utile cependant de signaler les hypothèses qui ont été longtemps admises et qui avaient pour but d'expliquer les propriétés générales que nous venons d'indiquer d'une manière sommaire.

Les actions magnétiques que nous avons résumées ont été attribuées à l'existence de fluides impondérables; les propriétés distinctes des pôles de noms contraires ont naturellement conduit à admettre l'existence de deux fluides distincts, l'action de chacun d'eux étant prépondérante à chacun des pôles. Ces fluides jouissent de la propriété d'agir à distance l'un sur l'autre, de telle sorte que les fluides de même nom se repoussent et que les fluides de noms contraires s'attirent : ces fluides seraient d'ailleurs liés aux molécules matérielles de telle sorte que les corps qui les contiennent obéissent aux actions répulsives et attractives subies par les fluides qu'elles contiennent.

Les effets qui se manifestent lors de la rupture d'un barreau aimanté ne permettent pas d'imaginer que chaque fluide est localisé dans l'une des moitiés; mais il faut, au contraire, admettre que chaque molécule contient les deux fluides, séparés d'ailleurs, les molécules étant orientées, c'est-à-dire qu'elles sont disposées de telle sorte que les parties qui contiennent un même fluide sont toutes tournées d'un même côté. Une analyse de ce qui doit se passer alors montre que l'action de chaque fluide doit être prépondérante dans l'extrémité situé du côté où sont dirigées les parties qui les contiennent dans chaque molécule, tandis qu'au milieu, par raison de symétrie, l'action doit être nulle.

11. — Les corps magnétiques non aimantés différeraient alors des aimants, en ce que les fluides ne présenteraient pas cette orientation : soit que la séparation existât sur chaque molécule, mais que l'orientation ne fût pas la même sur chaque aimant particulaire, les axes de ceux-ci ayant une direction quelconque, variable de l'un à l'autre, de sorte qu'il n'en pourrait résulter aucune action déterminée; soit que les deux fluides ne fussent pas séparés sur chaque molécule, mais fussent au contraire répartis uniformément l'un et l'autre de manière que leurs effets se détruiraient réciproquement, leur ensemble constituant le *fluide neutre*. L'aimantation d'un corps

consisterait soit dans l'orientation des particules, soit dans la séparation des fluides sur chacune d'elles, le résultat étant, dans l'un et l'autre cas, l'orientation des fluides.

La force coercitive consisterait en une propriété spéciale qui s'opposerait à tout changement dans la distribution des fluides, soit pour produire, soit pour détruire leur orientation.

Les effets d'influence s'expliquent facilement d'après les indications qui précèdent : sous l'influence d'un pôle, c'est-à-dire par suite de l'action d'un fluide, les fluides contenus dans un corps neutre s'orienteraient : un pôle nord orienterait, par exemple, les fluides de manière à diriger de son côté les parties comprenant le fluide opposé, par conséquent, ferait naître de son côté un pôle sud. L'action d'influence précéderait toujours l'attraction produite par l'aimant sur un corps magnétique : si l'orientation des fluides ne pouvait se produire dans un corps neutre, celui-ci ne pourrait être attiré, puisque le fluide neutre contenant les deux fluides ne peut être ni attiré ni repoussé par un pôle quelconque.

12. — L'action de la terre, dans cette hypothèse, s'expliquerait enfin en admettant que la terre est un vaste aimant dont l'axe diffère un peu de la ligne des pôles géographiques. Il est facile de reconnaître que cette supposition rend compte des directions que prend l'aiguille aimantée en chaque point du globe terrestre. Gilbert a d'ailleurs vérifié directement cette concordance approximative en déterminant l'action, sur une petite aiguille aimantée, d'un aimant naturel qu'il avait taillé en sphère : l'aiguille était suspendue librement, et le globe tournait dans le voisinage, de manière que chacun des points de celui-ci se plaçât successivement dans le voisinage de l'aiguille. Gilbert observa que les positions relatives de cette aiguille et du globe étaient analogues à celles que prend une aiguille que l'on transporte en divers points de la terre.

Il résulte de cette hypothèse que chacun des deux fluides aurait une influence prépondérante dans l'un des hémisphères terrestres; on leur a donné naturellement des noms qui correspondent à cette idée : le fluide qui aurait une action prépondérante dans l'hémisphère boréal de la terre est appelé *fluide boréal;* pour une raison analogue, l'autre est désigné sous le nom de *fluide austral.*

Dès lors, le pôle nord d'une aiguille aimantée étant dirigé vers le nord de la terre, doit contenir un fluide opposé, c'est-à-dire du fluide austral. Pour cette raison, le pôle nord d'un aimant est appelé souvent *pôle austral*, et, naturellement, le pôle sud est désigné sous le nom de *pôle boréal* (4).

Il y a un inconvénient réel à ces doubles dénominations dont les sens propres sont en opposition. Nous rejetterons les dernières appellations qui sont liées à une hypothèse non vérifiée; celles de pôle nord et de pôle sud sont l'expression de faits expérimentaux et ne peuvent présenter aucun inconvénient.

13. — Les fluides magnétiques existant ainsi dans tous les points des aimants, on voit que les actions observées ne sont jamais que des résultantes des forces élémentaires correspondant à chacune des molécules des corps considérés. Quoi qu'il en soit, nous considérerons seulement maintenant ces résultantes dont nous devons supposer le point d'application bien déterminé, nous réservant de revenir ultérieurement sur la question pour en définir plus complètement les éléments : c'est le point d'application de la résultante correspondant à chaque fluide qui constitue le pôle correspondant.

14. Lois des attractions et des répulsions électriques. — Balance de torsion. — Il importe de savoir à quelles lois obéissent les forces attractives et répulsives qui se manifestent entre les aimants mis en présence : ces forces dépendent de la distance et des masses magnétiques. Coulomb a donné l'énoncé suivant :

1re loi : *Les attractions et répulsions magnétiques varient en raison inverse du carré de la distance.*

Si donc f et f' sont les forces observées à des distances d et d', on doit avoir :

$$\frac{f}{f'} = \frac{d'^2}{d^2},$$

ou bien :

$$fd^2 = f'd'^2,$$

c'est-à-dire encore que, pour les mêmes aimants en présence, le produit de la force par le carré de la distance est constant.

On peut démontrer cette loi de plusieurs manières et d'abord en se servant de la balance de torsion. Cet appareil est basé sur les lois qui régissent la torsion des fils : on sait que le couple qui tend à ramener à la position normale un fil qui a été tordu d'un certain angle est proportionnel à cet angle et à la section du fil, et en raison inverse de la longueur; par suite, en faisant varier ces deux derniers éléments dont on dispose par la construction de l'appareil, on peut donner au couple de torsion des valeurs aussi faibles qu'il convient.

La balance de Coulomb est formée essentiellement par un fil métallique fixé à son extrémité supérieure et supportant une aiguille

aimantée : le tout est enfermé dans une cage en verre, cylindrique ou carrée, dont la base supérieure est percée au centre d'une ouverture sur laquelle s'élève un tube qui porte une pièce métallique ou *micromètre* à laquelle est fixé le fil. Celui-ci est serré dans une pince, ou mieux, s'enroule sur un treuil qui permet d'élever ou d'abaisser quelque peu l'aiguille aimantée. Ce treuil est solidaire d'un tambour qui tourne sur un tambour fixé à la partie supérieure du tube de verre : des divisions tracées sur la surface latérale permettent de mesurer le déplacement angulaire du tambour mobile. Sur les parois de la cage et à la hauteur de l'aiguille aimantée, règne une échelle graduée permettant d'évaluer en degrés le déplacement de l'aiguille.

A l'aide de précautions qu'il serait sans intérêt de détailler ici, on dispose l'appareil de manière que l'aiguille se dirige librement dans le plan du méridien magnétique et que, en même temps, le fil ne soit soumis à aucune torsion. Si l'on déplace alors l'aiguille seule ou le micromètre supérieur seul, le fil subira une torsion marquée par l'angle même dont on aura fait tourner l'une de ses extrémités : si l'aiguille et le micromètre tournent ensemble, la torsion du fil sera la somme des déplacements de ces deux pièces, s'ils ont eu lieu en sens contraire ; elle sera la différence si ces déplacements ont eu lieu dans le même sens, ainsi qu'il est très facile de le concevoir.

Le principe des expériences est facile à concevoir : si l'aiguille est déviée de sa position normale, par l'action d'un pôle, c'est que la force émanée de ce pôle et qui produit cette déviation fait équilibre à la force de torsion et à la force magnétique terrestre qui, l'une et l'autre, tendent à ramener l'aiguille. (En réalité, il conviendrait de parler des couples et non des forces, mais il n'y a pas d'erreur sensible si le centre de l'aiguille peut être considéré comme ne se déplaçant pas.) La connaissance de ces deux forces donnera donc la valeur de la force cherchée : on fera d'autres mesures avec des déviations différentes, ce qui changera la distance, et l'on pourra ainsi vérifier la loi.

La grandeur de l'angle de torsion donne la valeur de la force de torsion, mais il faut savoir à chaque instant quelle est la valeur du couple terrestre. Comme on peut démontrer qu'il varie proportionnellement au sinus de la déviation, il faut seulement connaître le rapport de ces deux forces, ce que l'on peut avoir directement.

Voici d'ailleurs la marche et les chiffres d'une expérience de Coulomb :

On détermine d'abord l'action de la terre en cherchant le couple de torsion qui correspond à une déviation donnée. Dans une expérience, Coulomb reconnut que pour dévier l'aiguille aimantée de $\alpha = 20°$ (fig. 7), il avait fallu tourner le micromètre supérieur de 2 tours complets, soit $\beta = 720°$; la torsion est donc de 700°, et cette valeur peut servir de mesure au couple de torsion qui lui est proportionnel. Pour une autre déviation α, la valeur du couple de torsion serait $700 \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin 20}$; mais, tant que les angles observés ne sont pas grands, on peut admettre comme approximation que les sinus varient proportionnellement aux angles : le couple de torsion sera alors $700 \cdot \frac{\alpha}{20} = 35 \cdot \alpha$, c'est-à-dire que, dans les limites indiquées, il faut tordre le fil de 35° pour chaque degré dont l'aiguille s'écartera de sa position d'équilibre.

Ceci posé, le fil fut détordu (fig. 7) et l'aiguille revint à sa position d'équilibre *ab* dans le plan du méridien magnétique : Coulomb plaça alors verticalement un fil aimanté dans ce plan, de manière que les pôles de même nom fussent en présence : ce fil aimanté A B avait une longueur assez grande (0 m, 60) pour que l'action du second pôle fût faible et de plus cette force agissant très obliquement était encore diminuée par là même : on pouvait donc considérer les pôles en présence comme produisant seuls les effets observés qui, dans ce cas, étaient des répulsions. L'aiguille fut repoussée de $\alpha = 24°$, l'action du barreau était, à ce moment, contre-balancée par celle de la torsion du fil, mesurée par 24, et par l'action de la terre mesurée par 35×24, soit en tout $36 \times 24 = 864$.

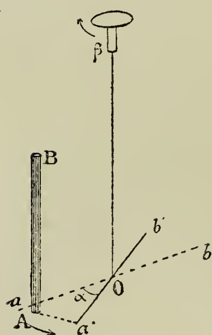


Fig. 7.

Le micromètre supérieur fut alors tourné de 3 circonférences entières en sens contraire de la déviation qui fut réduite à 17°. La torsion était alors de $(3 \times 360) + 17 = 1097$, et l'action de la terre $35 \times 17 = 595$, soit en totalité $1097 + 595 = 1692$, valeur qui mesurait la force répulsive.

La rotation du micromètre supérieur fut continuée jusqu'à ce qu'elle atteignit 8 circonférences : la déviation fut réduite à 12°. La déviation était alors $360 \times 8 + 12 = 2892$ et l'action de la terre était mesurée par $35 \times 12 = 420$; la force totale à laquelle faisait équilibre la force électrique était donc $2892 + 420 = 3312$.

On peut, d'autre part, considérer les nombres 24, 17 et 12 qui re-

présentent les arcs, comme mesurant approximativement les distances auxquelles les répulsions se sont produites; si donc nous appliquons le second énoncé que nous avons donné, on devrait avoir la même valeur pour les trois produits suivants :

$$864 \times 24^2 = 497664$$
$$1692 \times 17^2 = 488948$$
$$3212 \times 12^2 = 477216$$

produits dont les différences extrêmes sont seulement de $\frac{1}{25}$ de leur valeur, ce qui démontre la loi dans les limites des erreurs d'observation. On comprend d'ailleurs que les distances n'étant pas mesurées rigoureusement et les parties voisines du barreau agissant, quoique faiblement, on ne pouvait espérer arriver à une vérification absolue.

Des expériences du même genre répétées sur des pôles de noms contraires, montrèrent que l'énoncé de la loi s'applique également aux attractions.

15. — Nous dirons sans insister que Coulomb vérifia la même loi par la méthode des oscillations; pour cela il faisait osciller une aiguille aimantée soumise d'abord à la seule action de la terre; puis placée à des distances variables d'un pôle d'un aimant placé verticalement et assez long pour que l'autre pôle pût être considéré comme étant sans action. En appliquant la formule indiquée ci-dessous[1], Coulomb trouva que la loi était vérifiée par les résultats numériques qu'il obtenait.

1. La durée de l'oscillation d'un corps soumis à une force constante en intensité et en direction est donnée par la formule

$$t = \pi \sqrt{\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{F}l}},$$

dans laquelle I est le moment d'inertie, F la grandeur de la force appliquée en un point distant de l du centre de rotation.

Soit t la durée de l'oscillation d'une aiguille aimantée soumise à l'action magnétique terrestre, on aura :

$$t = \pi \sqrt{\frac{\mathrm{I}}{\Phi l}},$$

Φ mesurant l'action terrestre qui est supposée constante en un même lieu. Plaçons à la distance d_1 un barreau et soient F_1 la force correspondante, t_1 la durée de l'oscillation, on a :

$$t_1 = \pi \sqrt{\frac{\mathrm{I}}{(\Phi + \mathrm{F}_1) l}}.$$

Ajoutons encore que Gauss vérifia la même loi par un procédé tout différent.

16. Moments magnétiques. — Masses magnétiques. — Si en un même point du globe et au même instant on examine deux barreaux aimantés, identiques comme forme et comme poids, on trouve en général qu'ils n'exercent pas ou ne subissent pas les mêmes actions, soit en évaluant dans la balance de Coulomb la valeur du couple de torsion correspondant à une déviation donnée de l'aiguille, soit en déterminant la durée de l'oscillation de ces barreaux sous l'influence de la terre. On dit alors que les deux barreaux n'ont pas le même *moment magnétique;* on dirait au contraire que les *moments magnétiques* sont égaux si ces diverses actions étaient égales.

En admettant, jusqu'à nouvel ordre, que ces actions émanent des pôles que nous supposons placés de la même façon, nous en conclurons que les fluides sont en quantités inégales ou égales aux pôles de ces aimants, que ces pôles ont des *masses magnétiques* inégales ou égales.

17. — Si l'on évalue les forces exercées par un même aimant sur deux aiguilles aimantées de même forme et de même poids, et placées à la même distance, nous conviendrons de prendre ces forces mêmes comme mesure des masses magnétiques de ces aiguilles.

Il résulte de là que, à cause de l'égalité de l'action et de la réaction, la force qui s'exerce entre deux pôles doit être proportionnelle aux produits de ces deux masses.

et l'on aurait de même pour une autre distance d_2 :

$$t_2 = \pi \sqrt{\frac{I}{(\Phi + F^2) l}} \cdot$$

On déduit de là successivement :

$$\frac{t^2}{t_1^2} = \frac{\Phi + F_1}{\Phi},$$

et

$$\frac{t^2 - t_1^2}{t_1^2} = \frac{F_1}{\Phi};$$

et de même, on a :

$$\frac{t^2 - t_2^2}{t_2^2} = \frac{F_2}{\Phi};$$

on peut enfin calculer

$$\frac{F}{F_2} = \frac{t^2 - t_1^2}{t^2 - t_2^2} \cdot \frac{t_2^2}{t_1^2} \cdot$$

Or, on trouve que les nombres fournis par l'expérience rendent le second membre égal à $\frac{d^2_2}{d_1^2}$,

ce qui vérifie la loi.

Si donc f est la force qui s'exerce entre deux masses magnétiques m et m' situées à une distance d l'une de l'autre, on a le droit d'écrire :

$$f = \frac{mm'}{d^2}.$$

Ceci revient à prendre pour *unité de masse magnétique* celle qui, agissant sur une masse égale située à l'unité de distance, donne naissance à l'unité de force (si $f = 1$, $d = 1$, on a $m = m' = 1$).

Il résulte évidemment de cette définition que l'unité de masse magnétique dépend des unités choisies pour la mesure des distances et pour celle des forces. Nous admettrons dans tout ce qui suit que l'on fait usage des unités qui ont été choisies par la *British Association* [1].

Il va sans dire que, dans tous les cas où il y a à considérer la rotation d'un barreau aimanté, il importe de tenir compte, non seulement de la masse magnétique supposée concentrée au pôle, mais aussi de la distance de ce pôle au centre de rotation. On appelle *moment magnétique* du barreau le produit de la masse magnétique par la distance qui sépare les deux pôles. Comme nous le dirons, cette quantité figure dans un certain nombre de formules.

18. — L'étude des masses magnétiques n'est pas sans présenter de réelles difficultés. Nous ne connaissons en effet aucun moyen d'ajouter en un même pôle deux masses magnétiques que l'on aurait mesurées isolément, pas plus que nous ne savons partager,

1. Nous devons signaler ici quelques notions qui ne sont pas sans importance au sujet de ces unités.

Les unités auxquelles se rapporteront toutes les questions relatives aux mesures magnétiques et électriques seront les suivantes :

Pour les longueurs : le centimètre ;

Pour le temps : la seconde sidérale ;

Pour les masses : la masse du corps d'un poids de 1 gramme.

Le système défini par ce choix d'unités est souvent désigné, surtout en Angleterre, par les lettres CGS (centimètre, gramme, seconde).

Indépendamment de ces unités principales, il y a d'autres unités secondaires qui sont liées à celles-ci par les relations indiquées par la mécanique ou la physique, telles que les unités de force, de travail mécanique, de chaleur, etc. Dans un système rationnel d'unités, ces unités doivent se correspondre, et c'est précisément un des caractères, au moins en ce qui concerne l'électricité et le magnétisme, du système proposé par la *British Association* et adopté avec quelques modifications par le Congrès international des électriciens (Paris, 1881), système sur lequel nous reviendrons plus tard avec quelques détails.

L'unité de force, unité dérivée, mais très fréquemment usitée, est la force qui, appliquée à l'unité de masse, lui communique une accélération égale à 1 (c'est-à-dire qui, pendant la première seconde du mouvement, lui fait parcourir un espace égal à la moitié de l'unité de longueur).

suivant un rapport donné, une masse magnétique déterminée ; ainsi dans l'aimantation, il n'y a pas fractionnement du magnétisme, le barreau qui sert à aimanter ne changeant pas par le fait de l'opération.

M. Airy a montré expérimentalement que si l'on prend des aiguilles aimantées de mêmes dimensions et de même poids et aussi identiques que possible au point de vue magnétique, les actions subies ou exercées par des systèmes composés d'un certain nombre d'aiguilles placées parallèlement étaient toujours proportionnelles au nombre d'aiguilles et par conséquent à la quantité de magnétisme, qu'il s'agît de l'action exercée sur ces systèmes par la terre seule, ou par la terre et un barreau aimanté, ou au contraire que ce système d'aiguilles fût appelé à réagir sur un barreau ou une aiguille aimantée.

Les actions sont donc bien proportionnelles aux quantités de magnétisme et l'on voit que c'est à juste titre qu'on prend les premières pour mesurer les secondes.

Nous ferons remarquer cependant que la question n'est peut-être pas tout à fait aussi simple qu'elle le paraît au premier abord, car il faudrait en réalité opérer sur des quantités différentes de magnétisme appliquées en un même point et non pas réparties sur différents corps.

19. Champ magnétique. — Lignes de force. — L'existence d'un aimant en un point donne naissance à des phénomènes particuliers, dont nous avons étudié quelques-uns seulement, dans les corps qui sont placés dans le voisinage, jusqu'à une certaine distance. L'étendue dans laquelle ces actions sont appréciables est appelée souvent le *champ magnétique*, et, par abréviation, on peut raisonner comme si ces actions étaient dues au champ magnétique au lieu de les rapporter à leur cause réelle, à l'aimant. Faraday a imaginé de caractériser l'influence de ce champ magnétique par des *lignes de force* qui sont telles que, en chaque point, leur direction donne la direction de l'action magnétique qui est réellement produite par l'aimant : il faut en outre donner l'intensité de l'action magnétique. Si l'on considère une aiguille aimantée, placée perpendiculairement aux lignes de force en un point, cette aiguille tendra à être ramenée au parallélisme, l'action attractive sur l'un de ses pôles constituant un couple avec l'action répulsive sur l'autre pôle : convenons alors que l'existence d'*une* ligne de force corresponde à une valeur quelconque de la force magnétique, valeur que nous prendrons pour unité, on conçoit que l'aiguille en

question sera soumise à une action d'autant plus énergique, qu'elle coupera un plus grand nombre de lignes de force, c'est-à-dire que celles-ci seront plus serrées. L'intensité d'action du champ magnétique sur un espace donné dépendra donc du rapprochement plus ou moins grand des lignes de force. Comme il ne s'agit que de rapports dans ces considérations générales, on pourra prendre un écartement quelconque comme unité.

On peut déterminer par des expériences directes la forme des lignes de force : il suffit, par exemple, de promener dans le champ magnétique une petite aiguille aimantée. Dans chacune de ses positions d'équilibre, son axe doit être tangent à la ligne de force :

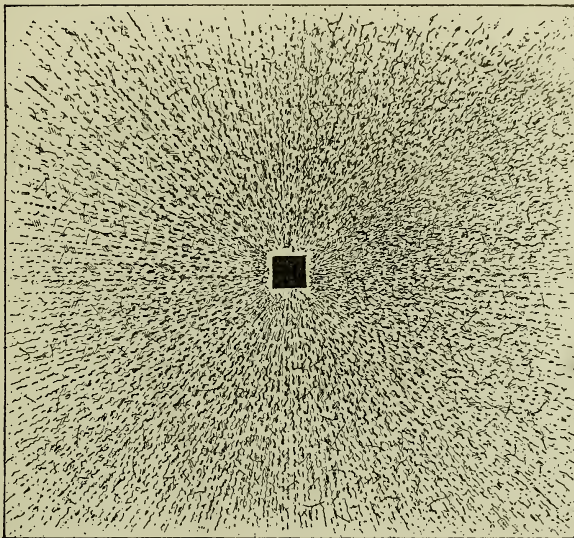


Fig. 8.

on pourra donc, de proche en proche, tracer approximativement l'une de ces courbes. On recommencerait à partir d'un autre point, pour en avoir une seconde.

Les lignes courbes tracées par la limaille magnétique, donnent, par une raison analogue, la forme des lignes de force, chaque parcelle métallique étant devenue un aimant par influence, et ayant dû se placer dans la direction même qu'aurait prise l'aiguille de l'expérience précédente.

Les figures 2, 8, 9 et 10, qui représentent des spectres magnétiques, montrent bien la direction des lignes de force dans diverses circonstances. La figure 2 représente le spectre produit par un ai-

mant agissant dans sa longueur, et la figure 8 correspond au cas d'un aimant qui se présente par une extrémité ; on ne peut pas ne pas être frappé dans ce cas de la régularité de distribution des lignes de force, régularité qu'il était d'ailleurs facile de prévoir.

Les figures 9 et 10 représentent le champ magnétique correspondant à la réunion de deux barreaux placés parallèlement et de même sens ou de sens contraire (dans chaque cas le pôle marqué d'un point blanc est le pôle nord) et l'on voit aisément la position que prendrait une aiguille aimantée de petite dimension que l'on placerait en un point quelconque de l'un ou de l'autre champ magnétique.

Si l'on a un pôle très éloigné, on peut considérer, au moins sur

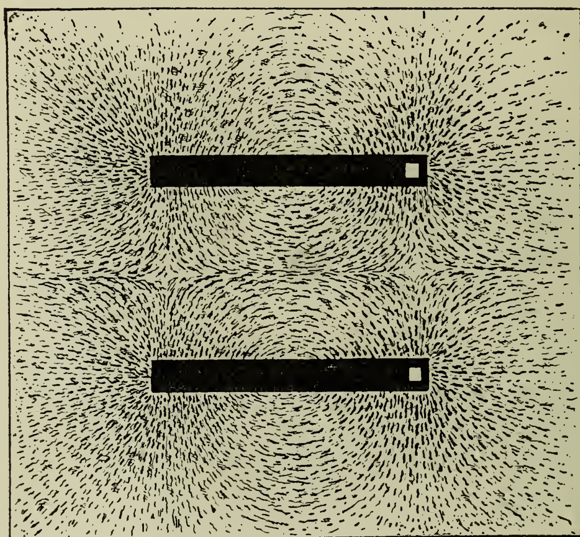


Fig. 9.

une petite étendue, les lignes de force comme parallèles entre elles et également espacées ; c'est ce que l'on appelle un champ uniforme : c'est, par exemple, celui qui résulte de l'action de la terre.

20. — Si l'on compare la figure 2 à la figure 9 et à la figure 10, on voit que les lignes de force correspondant à l'existence de chacun des pôles ont changé de forme : les lignes qui partent de deux pôles de même nom, aux points où elles se rapprochent, se recourbent comme si elles se repoussaient, celles qui unissent deux pôles de même nom paraissent tendre à se redresser, à devenir moins courbes. On sait que le premier cas correspond à une répulsion des pôles, le deuxième à une attraction : on peut donc représenter d'une manière

matérielle les résultats que nous venons d'indiquer en imaginant que les lignes de force sont des fils élastiques allongés qui tendent à se raccourcir, mais qui se repoussent les uns les autres et qui dans leurs mouvements entraînent les corps auxquels ils s'attachent.

Cette représentation matérielle imaginée par Faraday permet de se rendre compte de divers effets que nous aurons ultérieurement l'occasion de signaler.

Le champ magnétique peut subir des changements par suite de l'approche d'un second aimant ou d'un fer doux, ou même par suite de l'existence d'un courant électrique : on peut même obtenir un champ magnétique bien déterminé comme conséquence de l'exis-

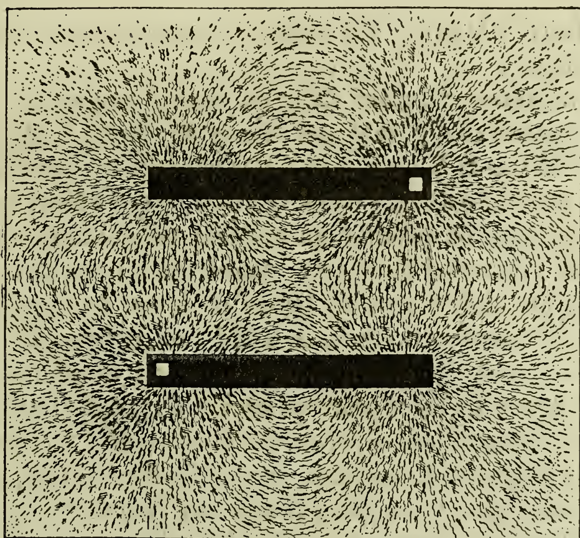


Fig. 10.

tence de courants électriques seulement. C'est principalement dans l'explication des phénomènes qui se produisent dans ces derniers cas que la considération des lignes de force présente un certain intérêt; nous y reviendrons avec quelques détails lorsque nous nous occuperons de ces questions.

Ajoutons enfin que si l'on cherche, dans le champ magnétique, à partir d'un point, la courbe pour laquelle l'action sur un pôle a une valeur constante, on trouve que cette courbe d'égale intensité coupe à angle droit les lignes de force qu'elle rencontre. Cette détermination peut se faire en mesurant la durée des oscillations d'une aiguille aimantée en chaque point.

Pour plus de simplicité, nous avons raisonné comme si l'on étudiait les actions qui se produisent dans un plan seulement; mais en réalité, il faudrait considérer des lignes de force dans tout l'espace et ces lignes seraient coupées à angle droit par les surfaces d'égale intensité.

21. Intensité du champ magnétique. — Moment magnétique. — Si l'on étudie l'action magnétique par la considération du champ magnétique, il faudra en chaque point se donner la direction de la ligne de force correspondante et l'*intensité* H du champ magnétique au point considéré : cette intensité sera définie par la relation

$$f = m\,H,$$

f étant la force à laquelle est soumise la masse magnétique m au point considéré[1].

Lorsqu'un aimant est placé dans un champ magnétique d'intensité H, perpendiculairement aux lignes de force, à chaque pôle agit une force $f = m\,H$: ces deux pôles constituent un couple dont le moment est $G = m\,l\,H$, l étant la distance qui sépare les pôles : ce couple est égal au produit du moment magnétique du barreau aimanté par l'intensité du champ magnétique. Il est clair que si le barreau fait un angle α avec les lignes de force, le couple qui agit sur lui a pour valeur $m\,H\,l\,\text{Sin}\,\alpha = G\,\text{Sin}\,\alpha$. Si, comme nous l'avons indiqué, l'intensité du champ magnétique est déterminée par le nombre de lignes de force pour un espace donné et si nous supposons que les distances qui séparent ces lignes soient très petites par rapport à la longueur du barreau, on voit facilement que, pour une position quelconque, le couple qui agit sur l'aiguille a un moment qui est proportionnel au nombre de lignes de force rencontrées par la ligne qui joint les pôles.

22. Étude détaillée de l'action de la terre. — Couple directeur terrestre. — L'action de la terre sur un aimant peut s'expliquer comme nous l'avons indiqué (12) en imaginant que la terre agit elle-même comme un aimant possédant également deux pôles. Les effets produits par la terre sur l'aiguille aimantée dans diverses conditions doivent pouvoir se déduire de la considération des forces émanées de chacun des deux pôles magnétiques de la terre et appliquées aux deux pôles du barreau. Nous allons indiquer quelques-uns

1. Cela revient à dire que l'*unité de champ magnétique* correspond à un champ magnétique, où l'unité de masse magnétique subirait l'unité de attraction égale à l'unité de force.

des résultats les plus simples en indiquant comment ils ont été vérifiés par l'expérience.

On peut reconnaître à priori que l'action de l'aimant terrestre sur un barreau aimanté se réduit à un couple, qu'elle est par conséquent purement directrice, en se basant sur les indications préliminaires que nous avons données.

Soit NS un barreau aimanté (fig. 11) : le pôle boréal de l'aimant terrestre agira sur les deux pôles de ce barreau, par attraction sur le pôle nord N, par répulsion sur le pôle sud S. Ces deux forces NB et SB′ seront égales et parallèles à cause de la grande distance de l'aimant terrestre. De même le pôle austral de l'aimant terrestre agira, attractivement sur S et répulsivement sur N, par deux forces égales et parallèles NC et SC′ pour la même raison. Le pôle N sera donc soumis à l'action d'une résultante ND qui sera égale et parallèle à la résultante SD′ qui agira au point S, à cause de l'égalité des deux parallélogrammes NCDB et SC′D′B′. Donc l'aiguille NS subit

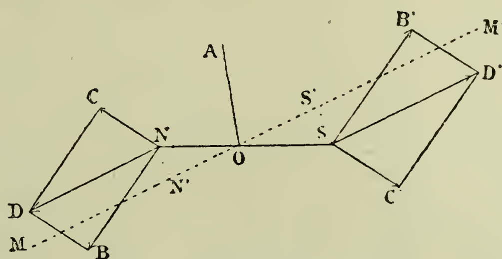


Fig. 11.

l'action de deux forces égales, parallèles et de sens contraires, c'est-à-dire d'un couple que nous désignerons sous le nom de couple terrestre.

Ce couple ne peut communiquer aucune translation à l'aiguille ; il est seulement directeur ; c'est-à-dire que si l'aiguille peut tourner autour d'un point O, elle tournera jusqu'à ce que la ligne des pôles NS arrive en N′S′ parallèlement à la direction des forces qui, alors, étant directement opposées, se feront équilibre.

On voit immédiatement que si l'aiguille est à égale distance des deux pôles de l'aimant terrestre, les quatre forces sont toutes égales et également inclinées : les résultantes seront alors horizontales et l'aiguille librement suspendue sera dirigée horizontalement lors de l'équilibre.

Lorsque l'on considère un point situé dans l'hémisphère nord, les forces NB et SB′ sont plus intenses que NC et SC′ puisque l'on est plus près du pôle nord, elle sont d'ailleurs plus inclinées sur

l'horizontale : la résultante ND est donc située au-dessous de l'horizontale entraînant ainsi le pôle nord au-dessous de l'horizontale lors de l'équilibre. L'effet inverse se manifeste évidemment dans l'hémisphère sud.

Nous avons déjà dit sommairement, que tels sont bien les effets observés.

23. — On peut vérifier avec une grande précision que la terre n'exerce qu'une action directrice sur un barreau aimanté.

1° La terre ne donne naissance à aucune composante horizontale produisant la translation.

On le reconnaît grossièrement, en posant un aimant sur un flotteur reposant sur un liquide : le flotteur tourne sur lui-même, mais n'est pas entraîné.

On peut d'ailleurs faire une expérience beaucoup plus précise, de la manière suivante : A l'extrémité d'un fil AB (fig. 12) que l'on prend fin et long, on suspend une légère planchette. D'un côté, on place une aiguille aimantée sur un pivot en C, de l'autre un contre-poids qui maintient la planchette horizontale. L'aiguille étant enlevée et remplacée par un corps inerte et de même poids, le système prend une position d'équilibre pour laquelle le fil ne présente aucune torsion, position que l'on détermine à l'aide de repères quelconques. On enlève alors le corps inerte et on met l'aiguille aimantée sur le pivot : celle-ci tourne jusqu'à ce qu'elle soit dans le plan du méridien magnétique, mais la planchette ne subit aucun déplacement. Ce déplacement se produirait cependant certainement si l'aiguille était soumise à *une* force, susceptible dès lors de produire une translation, lors même que cette force serait très faible, car elle agirait à l'extrémité d'un long bras de levier, et ne serait contre-balancée que par le couple de torsion du fil, couple que l'on rend aussi petit qu'on le veut en diminuant la section et surtout en augmentant la longueur de ce fil.

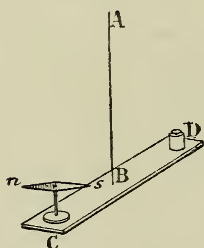


Fig. 12.

2° La terre ne donne naissance à aucune composante verticale de translation.

On prend une aiguille ou un barreau d'acier non aimanté et on le pèse avec soin; puis on l'aimante, et on le pèse de nouveau. On n'observe alors aucune variation de poids, ce qui serait arrivé si l'action de la terre sur un barreau aimanté donnait naissance à une force verticale qui se composerait avec le poids du barreau.

La terre, ne donnant lieu à aucune action de translation ni horizontale ni verticale, n'en saurait produire une oblique; puisque celle-ci donnerait une composante horizontale et une composante verticale que l'on aurait mises en évidence dans les expériences que nous venons de signaler.

24. Couples composants horizontaux et verticaux. — Les actions produites par le couple terrestre sur une aiguille librement suspendue, ne pouvant que produire des rotations autour de ce point, nous pouvons supposer le point de suspension invariable et ne considérer que l'une des forces, celle qui serait appliquée au pôle nord, par exemple. Nous pourrons toujours d'ailleurs remplacer cette force par ses composantes obtenues conformément aux règles de la mécanique.

Soient OMM′ (fig. 13) le plan du méridien magnétique, OH la force terrestre qui fait avec l'horizontale OM′ un angle i, angle d'inclinaison, et SN l'aiguille placée dans un plan vertical OPP′ faisant un angle α avec le méridien magnétique (cet angle α détermine ce que l'on appelle l'*azimut* du plan OPP′). La force appliquée au pôle N est NA parallèle à la direction OH; nous pouvons décomposer cette force en deux autres situées dans un plan parallèle au méridien magnétique : l'une verticale NB, l'autre horizontale NC. On peut considérer que la première qui est dans le plan OPP′ écarte l'aiguille de la position horizontale qu'elle occuperait si elle n'était soumise qu'à la force horizontale NC puisqu'elle est suspendue par son centre de gravité; la force horizontale NC a au contraire pour effet d'écarter l'aiguille du plan vertical où elle se trouve pour la ramener dans le méridien magnétique. Or, on reconnaît facilement [1] que la force NB est indépendante de l'angle α. Si, par conséquent, on vient à détruire l'action de cette composante dans un azimut quelconque, de ma-

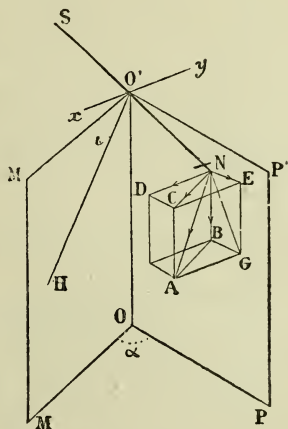


Fig. 13.

1. On peut décomposer OA, force terrestre dont nous désignerons la valeur par F, en deux forces, une verticale NB dont la valeur est $V = F \sin i$, et une horizontale NC qui est égale à $H = F \cos i$. Cette dernière, d'autre part, peut se remplacer par une force NE située dans le plan OPP′, soit $h = H \cos \alpha = F \cos i \cos \alpha$ et une force ND normale à ce plan, $h' = F \sin \alpha = F \cos i \sin \alpha$.

nière à rendre l'aiguille horizontale dans cet azimut, celle-ci restera horizontale dans tous les azimuts; ce que l'expérience vérifie facilement.

On peut rendre l'aiguille horizontale, soit en la forçant à tourner autour d'un axe vertical, soit en mettant du côté de OS un contre-poids dont la valeur et la position seront déterminées de manière à contre-balancer exactement l'action de la composante NB (ou plus exactement l'action du couple vertical constitué par NB et par la force égale et contraire appliquée en S); soit, et c'est ce que l'on fait le plus souvent, en suspendant l'aiguille par un point autre que le centre de gravité et choisi de manière à détruire les actions verticales. En général, lorsque la position du point de suspension a été déterminée à peu près, on ramène l'aiguille à l'horizontalité en donnant quelques coups de lime sur le côté le plus lourd.

25. Aiguille mobile dans un plan horizontal. — Lorsque l'aiguille a été ramenée à se mouvoir dans le plan horizontal, elle tend à revenir dans le plan du méridien magnétique sous l'influence de la composante NC : l'équilibre ne sera possible alors que lorsque l'aiguille sera dans la direction de cette force, c'est-à-dire lorsque l'aiguille sera dans le méridien magnétique. Une aiguille aimantée susceptible de se mouvoir dans un plan horizontal permet donc de déterminer le méridien magnétique aussi bien qu'une aiguille librement suspendue.

On reconnaît que, lorsque l'aiguille est écartée de cette direction d'un certain angle a, le moment de la force qui tend à l'y ramener est proportionnel à Sin a.

Coulomb a vérifié expérimentalement l'exactitude de cette conclusion, à l'aide de la *balance de torsion*[1].

26. Aiguille mobile dans un plan vertical. — Imaginons maintenant une aiguille aimantée ne pouvant que tourner autour d'un axe horizontal fixe xy passant par son centre de gravité, se mouvant par conséquent dans un plan vertical OPP′ déterminé par l'angle a

1. Si nous supposons que l'aiguille est ramenée dans le plan horizontal M′O′P′ et qu'elle ne puisse que tourner autour d'un axe vertical OO′, le couple qui tendra à la ramener dans le méridien magnétique sera produit par la force ND et la force opposée appliquée au S : son moment sera donc lh', l étant la distance qui sépare les deux pôles. Mais on a $lh' = l\text{F} \text{Cos}\, i \,\text{Sin}\, \alpha$. Le moment est à chaque instant proportionnel au sinus de l'azimut.

Pour le vérifier, on tourne le micromètre supérieur d'un angle T; la torsion se communique à l'aiguille qui tournerait aussi de T si elle n'était pas aimantée, mais qui, étant soumise à l'action de la terre, tourne d'un angle moindre t. Dans ce cas, la déviation de l'aiguille est t, et l'angle de torsion est $\text{T}-t$; au moment de

qu'il fait avec le méridien magnétique. Dans ce cas, toute force perpendiculaire au plan OPP′ est détruite par le mode de suspension et est sans influence sur le mouvement ou l'équilibre de l'aiguille.

Soit NA la force terrestre appliquée au pôle N : on peut, comme nous l'avons déjà dit, la décomposer en deux forces, l'une verticale, NB; l'autre horizontale et parallèle au méridien magnétique, NC; mais celle-ci, à son tour, peut être remplacée par les deux composantes horizontales, ND perpendiculaire au plan OPP′ et NE située dans ce plan. Comme nous l'avons dit, la force ND est sans action, et l'aiguille est soumise seulement aux deux composantes NB et NE auxquelles on peut substituer leur résultante NG à laquelle l'aiguille va obéir, de telle sorte que, au moment de l'équilibre elle sera dirigée suivant NG. On reconnaît facilement[1] que la valeur de NG est $F\sqrt{\text{Sin}^2 i + \text{Cos}^2 i \,\text{Cos}^2 \alpha}$ et que l'angle j que cette force fait avec l'horizontale est déterminé par la relation

$$tg.\,j = tg\,i \times \frac{1}{\text{Cos}\;\alpha}.$$

Il résulte de cette formule que l'aiguille change de direction avec l'angle α, c'est-à-dire lorsque l'on fait varier la position du plan dans lequel elle peut seulement se mouvoir.

l'équilibre, le couple de torsion est égal à l'action du couple terrestre qui dès lors est proportionnel à l'angle de torsion T-t.

On recommence l'opération et l'on mesure des valeurs correspondantes T′ et t', T″ et t'', etc. Or d'après les chiffres trouvés on reconnaît que l'on a :

$$\frac{T - t}{\text{Sin}\;t} = \frac{T' - t'}{\text{Sin}\;t'} = \frac{T'' - t''}{\text{Sin}\;t''},$$

ce qu'il fallait démontrer.

1. Nous avons vu ci-dessus que la valeur h de la force NE est $h = \text{H Cos}\,i = \text{F Cos}\,i\;\text{Cos}\;\alpha$ parce que l'angle ENC est égal à α. La valeur de la force NK sera :

$$\varphi = \sqrt{V^2 + h^2} = F\sqrt{\text{Sin}^2 i + \text{Cos}^2 i\;\text{Cos}^2 \alpha},$$

et si d'autre part on désigne par j l'angle ENG, on aura :

$$tg.\,j = \frac{V}{h} = \frac{\text{F Sin}\;i}{\text{F Cos}\;i\;\text{Cos}\;\alpha} = \frac{tg\;i}{\text{Cos}\;\alpha}.$$

On écrit quelquefois cette dernière équation :

$$\text{Cot.}\,j = \text{Cot.}\;i \times \text{Cos}\;\alpha.$$

La discussion de cette formule n'offre aucune difficulté : elle est résumée ci-après. On voit immédiatement que si j_1 et j_2 sont deux angles correspondant à des plans rectangulaires, on a :

$$\text{Cot}^2 j_1 + \text{Cot}^2\,j_2 = \text{Cot}^2\,i.$$

La discussion rapide de cette formule montre que la valeur i, inclinaison de l'aiguille, est un minimum correspondant bien à $\alpha=0$, c'est-à-dire au cas où l'aiguille se meut dans le plan du méridien magnétique : lorsque l'angle a croît il en est de même de $tg\ j$ et par suite de j qui atteint enfin la valeur de 90° pour $a = 90°$, c'est-à-dire que l'aiguille devient verticale lorsque le plan qui la contient est perpendiculaire au méridien magnétique. Si l'on continue à faire tourner ce plan, l'angle j repasse par les mêmes valeurs, mais il faut remarquer que toujours l'extrémité de l'aiguille qui est au-dessous de l'horizontale reste située au nord de la verticale qui passe par le centre de suspension.

27. — On vérifie ces résultats à l'aide de la boussole d'inclinaison

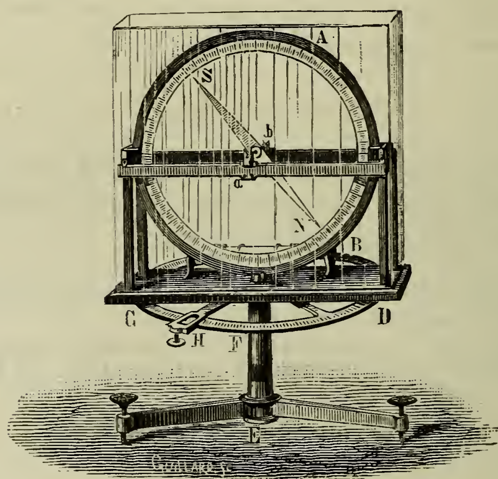


Fig. 14.

qui réalise pratiquement les dispositions que nous venons d'indiquer : elle se compose (fig. 14) d'un cercle vertical en cuivre présentant deux traverses horizontales au niveau de son centre et gradué sur la circonférence. Les deux traverses reçoivent les extrémités a et b de l'axe horizontal d'une aiguille aimantée NS qui ne peut ainsi que se mouvoir dans le plan du cercle et dont la position par rapport à l'horizontale s'obtient par la lecture de la division en face de laquelle s'arrête sa pointe. Le cercle vertical est mobile d'autre part autour d'un axe que l'on peut rendre parfaitement vertical à l'aide des vis calantes que porte son pied : une alidade H, liée au cercle vertical et mobile avec lui, se déplace sur un cercle horizontal gradué CD et

permet de mesurer les variations azimutales. En faisant tourner le cercle vertical autour de l'axe, d'une manière continue, on trouve que l'aiguille se meut régulièrement entre la verticale et une position telle que l'angle qu'elle fait avec l'horizontale est égale à l'inclinaison pour le lieu où l'on se trouve et, en rapportant ces positions à l'aiguille horizontale, on reconnaît bien que pour le dernier cas le plan vertical est parallèle à cette aiguille et que pour le premier elle lui est perpendiculaire.

28. — Au lieu de vérifier les résultats que nous avons indiqués par l'observation des positions d'équilibre d'un barreau aimanté, on peut les étudier par la durée des oscillations des aiguilles aimantées diversement suspendues et écartées de leurs positions d'équilibre. On sait, en effet, que la formule du pendule composé donne la durée des oscillations en fonction des forces ou des moments des couples qui agissent sur le corps oscillant.

L'étude des formules, que ce n'est pas ici le lieu de démontrer ni de discuter, conduit à quelques cas particuliers fort simples[1].

1. On remarque, en effet, que le couple terrestre conservant sa direction malgré les variations de position de l'aiguille, on peut appliquer à celle-ci la formule du pendule composé :

$$t = \pi\sqrt{\frac{I}{2\,Fl}},$$

dans laquelle t est la durée d'une oscillation, I le moment d'inertie de l'aiguille, F la valeur de la force appliquée à chacun des pôles et l la demi-longueur de l'aiguille.

Si l'on fait osciller une aiguille d'inclinaison placée dans le méridien magnétique, F sera alors la force terrestre même ; mais si l'on fait osciller une aiguille ramenée à l'horizontale, la valeur de la force qui agit est seulement $F\,\mathrm{Cos}\,i$ et la durée t' d'une oscillation étant :

$$t' = \pi\sqrt{\frac{I}{2\,Fl\,\mathrm{Cos}\,i}},$$

on en déduit :

$$\frac{t}{t'} = \sqrt{\mathrm{Cos}\,i}\,\cdot$$

On pourrait de même faire osciller une aiguille d'inclinaison dans un azimut quelconque, mais en général, les résultats auxquels on parvient ne sont pas simples, à cause de la forme complexe de la valeur de la composante qui agit dans ce cas ; le résultat devient simple au contraire, pour quelques positions particulières : soient en effet, t_1 et t_2 les durées des oscillations effectuées dans des plans dont les azimuts seraient α^1 et α_2 ; on aura :

$$t_1 = \pi\sqrt{\frac{I}{2\,Fl\,\sqrt{\mathrm{Sin}^2\,i + \mathrm{Cos}^2\,i\,\mathrm{Cos}^2\,\alpha_1}}}, \text{ et } t_2 = \pi\sqrt{\frac{I}{2\,Fl\sqrt{\mathrm{Sin}^2\,i + \mathrm{Cos}\,i\,\mathrm{Cos}^2\,\alpha_2}}}.$$

Ainsi 1° si t est la durée de l'oscillation d'une aiguille d'inclinaison mobile dans le plan du méridien magnétique et t' la durée de l'oscillation de l'aiguille ramenée à l'horizontalité et mobile dans un plan horizontal, on a, en désignant par i l'inclinaison :

$$\frac{t^2}{t'^2} = \text{Cos } i.$$

2° Si t_1 et t_2 sont les durées d'oscillations de l'aiguille d'inclinaison supposée mobile, d'abord dans le plan du méridien magnétique, puis dans un plan perpendiculaire, on a :

$$\frac{t_1^2}{t_2^2} = \text{Sin } i.$$

Ces divers résultats ont été vérifiés expérimentalement : ainsi, en particulier, Humboldt a fait des expériences à Quito où la valeur de l'inclinaison était alors de 14°26′ : en 10 minutes ou 600 secondes, une aiguille placée dans les conditions précédemment indiquées exécuta d'abord 220 puis 109 oscillations : on a donc $t_1 = \frac{600}{220}$ et $t_2 = \frac{600}{109}$ et par suite on doit avoir $\left(\frac{109}{220}\right)^2 = \text{Sin } i$. Or, on trouve $\left(\frac{109}{220}\right)^2 = 0,245$ et Sin $i = 0,249$. La vérification est donc aussi complète que possible.

29. Systèmes astatiques. — Il peut être nécessaire dans quelques circonstances d'avoir un système aimanté qui ne subisse pas l'action directrice de la terre, comme nous le verrons en particulier pour les galvanomètres, ou tout au moins pour lequel cette action soit très amoindrie sans diminuer cependant l'aimantation des pièces du système : un pareil système est dit *astatique*.

Deux procédés différents peuvent être employés : on peut, par exemple, se servir d'un barreau aimanté dont on détermine la position par tâtonnement, de manière que son action contrebalance et détruise exactement l'action terrestre. On peut, en modifiant quelque peu la distance ou la direction de cet aimant, modifier son action de manière qu'il cesse de rendre l'aiguille absolument asta-

Si, en particulier, on prend $\alpha_1 = 0$ et $\alpha_2 = 90°$, il vient :

$$t_1 = \pi \sqrt{\frac{I}{2\,Fl}} \text{ et } t_2 = \pi \sqrt{\frac{I}{2\,Fl \text{ Sin } i}}.$$

D'où il vient :

$$\frac{t_1}{t_2} = \sqrt{\text{Sin } i} \text{ et } \frac{t_1^2}{t_2^2} = \text{Sin } i.$$

tique et que celle-ci possède une force directrice que l'on détermine à volonté. On peut même se servir d'un semblable barreau que l'on aura retourné bout pour bout pour augmenter au contraire cette force directrice, ce qui peut être utile dans quelques circonstances.

Un autre système consiste à réunir par une tige rigide deux aiguilles aimantées que l'on place parallèlement au-dessus l'une de l'autre, de manière à ce que les pôles opposés soient en regard (fig. 15). On conçoit facilement que les actions exercées par la terre étant en sens opposés se détruisent plus ou moins complètement, et que, si les moments des couples directeurs étaient rigoureusement égaux, ce qui d'ailleurs est impossible à obtenir, le système resterait en équilibre dans tous les azimuts. On se borne seulement à obtenir une diminution de l'action directrice.

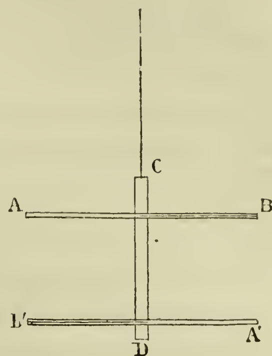


Fig. 15.

30. Distribution du magnétisme dans les aimants. — Nous avons dit que la propriété magnétique ne se manifeste pas avec la même intensité dans toute l'étendue d'un aimant : on a pu déterminer par diverses méthodes quelle est la *distribution du magnétisme*.

Coulomb a fait les premières recherches à cet égard; pour cela il se servait de la balance de torsion. Le barreau aimanté sur lequel il opérait glissait dans une rainure pratiquée dans une règle placée dans la cage de manière à se trouver dans le plan du méridien magnétique de l'aiguille. Lorsque le barreau était placé en face de l'aiguille, celle-ci était déviée et la déviation primitive dépendait du point du barreau en face duquel l'aiguille se trouvait; mais, à l'aide du micromètre, on ramenait toujours la déviation à la même valeur, et c'était la torsion qui indiquait la force répulsive et permettait, après que l'on eût tenu compte de l'action de la terre, de déterminer un nombre proportionnel à la quantité de magnétisme au point considéré.

Il faut remarquer que, en réalité, l'action est moins simple que nous ne le supposons, car ce n'est pas seulement le point situé en face de l'aiguille qui agit, mais aussi les parties situées au-dessus et au-dessous. Mais on doit noter que celles-ci agissent fort obliquement d'une part et que leur action diminue d'importance par là; puis, en outre, que le sens de la variation ne changeant pas, il y a une sorte de compensation et que l'on a un nombre qui mesure non

pas l'action due au seul point considéré, mais une action un peu plus forte et proportionnelle. Il faut remarquer cependant que cet effet ne se continue pas dans toute la longueur, et que lorsqu'on approche de l'extrémité du barreau, le nombre trouvé doit être trop faible, puisque d'un côté l'action oblique est très diminuée, ou même manque. Aussi, en arrivant à l'extrémité, Coulomb faisait une correction qui revenait à peu près à doubler le nombre obtenu directement.

Coulomb exécuta une autre série de mesures en déterminant l'intensité magnétique aux différents points par la durée des oscillations d'une petite aiguille aimantée que l'on avait fait osciller, au préalable, sous la seule action de la terre. Les mêmes remarques générales que nous avons indiquées plus haut sont applicables ici.

31. — M. Jamin étudia la distribution du magnétisme en déterminant à l'aide d'une balance la force nécessaire pour arracher un morceau de fer doux placé successivement en divers points.

Enfin, nous signalerons une méthode fort sensible que nous avons appliquée et qui consiste à déterminer l'intensité magnétique en un point par la valeur du courant d'induction produit dans une petite bobine que l'on écartait. Cette méthode permet, non seulement de déterminer la distribution du magnétisme, mais encore d'explorer complètement le champ magnétique.

32. — On peut représenter graphiquement les résultats obtenus, comme le faisait Coulomb, en élevant en chaque point de l'aimant une perpendiculaire dont la longueur soit proportionnelle à l'intensité observée et convenant de porter, de part et d'autre de l'axe qui représente le barreau, les longueurs qui correspondent à des actions magnétiques de sens contraires. On obtient ainsi des courbes symétriques par rapport au milieu du barreau, commençant à une distance de ce point variable suivant les aimants, dont les ordonnées croissent lentement d'abord, puis de plus en plus rapidement, au fur et à mesure que les points considérés sont plus rapprochés des extrémités (fig. 16). En s'appuyant sur des données numériques obtenues dans diverses séries d'expériences, Biot a montré que ces courbes peuvent être représentées par une formule telle que $y = \mathrm{A}\,(\mu^{x} - \mu^{2l\ \ x})$ dans laquelle $2l$ représente la longueur du barreau, x la distance du point considéré à l'extrémité, et y l'ordonnée de la courbe, ordonnée qui est proportionnelle à l'intensité magnétique; A et μ sont des constantes. Cette formule, d'ailleurs est purement empirique et n'a aucune signification rationnelle.

33. — La connaissance de l'intensité magnétique en chaque point

d'un barreau aimanté est indispensable pour savoir quelle est l'action exacte de ce barreau sur une masse magnétique quelconque.

Supposons d'abord cette masse réduite à un point et située à une très grande distance : les diverses actions qui s'exerceront entre cette masse et les divers points du barreau doivent alors être considérées comme parallèles et, les différences de distances étant alors négligeables, les actions élémentaires sont proportionnelles aux intensités magnétiques ou aux ordonnées de la courbe. On reconnaît alors, en s'appuyant sur des théorèmes connus de mécanique, que la valeur de la résultante qui est la somme de toutes les actions élémentaires est mesurée par l'aire de la courbe caractérisant pour chaque moitié du barreau la distribution magnétique. Le point d'application de cette résultante, qui sera réellement ce que l'on doit appeler le pôle, se trouvera, en vertu des mêmes théorèmes, au pied de l'ordonnée du centre de gravité de cette aire (fig. 16). On conçoit, d'après cette définition et d'après la forme de la surface, que

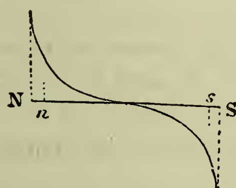


Fig. 16.

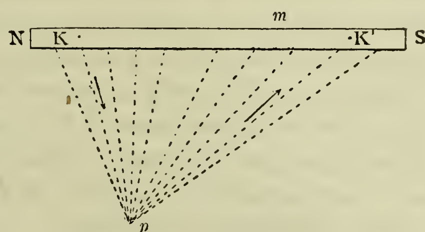


Fig. 17.

le pôle doit se trouver près de l'extrémité, mais non pas à l'extrémité même.

Mais il faut bien comprendre que ce pôle n'a d'importance que lorsque l'on considère les actions exercées sur un point à l'infini et que, pour toute masse magnétique p, située à une distance finie, il y a une résultante particulière appliquée à un point spécial. Pour déterminer ce point d'application, il faut déterminer chaque action élémentaire : l'action exercée par le point m (fig. 17), par exemple, sera représentée par une droite joignant le point p au point m, et sur laquelle on porterait une longueur qui serait proportionnelle à l'intensité magnétique en m, intensité mesurée par l'ordonnée du point m dans la courbe de distribution et en raison inverse du carré de la distance mp, distance qui varierait suivant les divers points considérés. On déterminerait ainsi chaque force élémentaire : leur résultante, calculée par les procédés ordinaires de la

mécanique, représenterait l'action totale, et le point K′ où elle rencontrerait le barreau serait le point d'application de cette force, et pour ainsi dire le *pôle magnétique du barreau par rapport à la masse p*. On voit que la position de ce pôle relatif dépendra de la position et de la distance de p, par rapport au barreau considéré.

Il faut ajouter que, dès que le barreau est à une distance un peu notable du point p, la position du pôle relatif à ce point varie peu avec la position même du point et diffère peu de celle du pôle absolu (ou pôle relatif à l'infini) tel que nous l'avons défini.

34. — Si maintenant on voulait déterminer exactement l'action d'un point sur un aimant, ou réciproquement, il faudrait opérer de la même manière pour chacune des deux moitiés, ce qui donnerait naissance à deux forces tendant à produire des actions opposées.

Si le point est à une distance infinie ou du moins très grande, il recevra des deux pôles deux actions parallèles égales et de sens contraire qui, par conséquent, s'annuleront ; d'autre part, l'aimant subira de la part de ce point deux actions égales, parallèles et de sens contraire, mais appliquées en des points différents, aux pôles, et constituant un couple, par conséquent.

Dans le cas où le point considéré n'est pas placé à une distance infinie, les deux forces dont il faut tenir compte ne sont pas absolument égales, ni absolument opposées : elles ne se détruisent donc pas complètement sur le point, et l'aimant est soumis en même temps à un couple et à une force.

Il importe de remarquer que les considérations précédentes sont seulement théoriques, car jamais on n'a une masse magnétique isolée p. En réalité, on a deux aimants et l'on devrait chercher les résultantes de toutes les actions élémentaires provenant des divers points de l'un des aimants agissant en sens convenable sur tous les points de l'autre aimant. Si les barreaux sont à une très grande distance, toutes les actions élémentaires se réduisent à des couples et l'action résultante sera, par suite, également un couple : il n'y aura qu'une action de direction. Il n'en sera pas de même si les aimants ne sont pas très éloignés : au couple qui existera toujours et tendra à donner une direction déterminée, se joindra une force de translation, attractive ou répulsive suivant les cas, et qui explique les déplacements dans un sens ou dans l'autre produits par un aimant sur un aimant voisin.

35. Corps magnétiques. — Corps diamagnétiques. — Ainsi que nous l'avons dit, ce n'est pas seulement le fer qui est sensible à l'action de l'aimant, mais toutes les substances ; on avait d'abord pensé que

les effets observés provenaient d'une petite quantité de ce métal existant dans des corps soumis à l'expérience. Mais des analyses précises montrèrent que les aimants agissaient sur des corps où il n'entrait absolument pas de fer. C'est spécialement depuis que l'on a employé des électro-aimants que des recherches suivies ont pu être faites : ces électro-aimants sont des aimants temporaires très énergiques produits par le passage d'un courant et sur lesquels nous insisterons plus tard ; il nous suffit de savoir actuellement qu'ils agissent dans tous les cas comme le feraient des aimants.

En soumettant des fragments de divers corps à l'action d'un puissant électro-aimant, on reconnaît que tous sont sensibles, mais que les uns, se comportant comme le fer, sont *attirés*, tandis que d'autres sont *repoussés*. La différence d'effets est rendue plus sensible en donnant à ces corps la forme de barreaux que l'on suspend par leur milieu à un fil fin entre les deux pôles d'un électro-aimant placés en regard. Pour le fer et les corps qui, comme lui, sont attirés par l'aimant, le barreau se met dans la direction de la ligne des pôles : il prend la direction *axiale*, suivant l'expression consacrée ; mais les corps qui sont repoussés prennent une position d'équilibre complètement différente ; ils se dirigent perpendiculairement à la ligne des pôles, *équatorialement*. Les corps qui se comportent de la première manière sont dits *magnétiques*, les autres sont *diamagnétiques*.

L'action se produit d'ailleurs aussi sur les liquides et les gaz ; pour étudier les liquides, on les place dans un tube de verre qui, suivant les cas, prend la direction axiale ou la direction équatoriale. On peut aussi mettre le liquide dans un verre de montre que l'on pose sur les pôles de l'électro-aimant, munis en conséquence d'armatures horizontales : la surface du liquide ne reste pas horizontale et présente au-dessus des pôles deux saillies si le liquide est magnétique, deux dépressions s'il est diamagnétique.

Les gaz sont également sensibles à l'action des aimants : on peut le mettre en évidence en plaçant une flamme entre les pôles de l'électro-aimant, ou bien en employant des tubes de verre remplis de gaz divers et suspendus en leur milieu. On peut encore, comme Faraday, étudier les déviations éprouvées par des colonnes de gaz coloré en présence des pôles.

Nous donnons dans le tableau I la liste des corps magnétiques et des diamagnétiques ; il nous suffira d'indiquer les principaux. Parmi les corps magnétiques nous signalerons, outre le fer et l'acier, le nickel, le cobalt, le platine et leurs sels, l'oxygène et le bioxyde

d'azote; parmi les corps diamagnétiques, nous indiquerons principalement le bismuth, l'antimoine et leurs sels, le phosphore, l'eau, l'alcool, l'hydrogène et la plupart des gaz.

Le fer est le plus magnétique de tous les corps et le bismuth le plus diamagnétique. A poids égal, l'oxygène agirait avec la même énergie que le fer s'il était réduit à occuper le même espace. L'azote étant presque inactif, l'air est cinq fois moins magnétique que l'oxygène.

36. — On peut expliquer les phénomènes de diamagnétisme en imaginant que dans les corps comme le bismuth, l'approche d'un pôle d'un aimant produit une action d'influence qui donne naissance à un pôle de même nom. Il est facile de voir que cette supposition qu'il est d'ailleurs impossible d'expliquer rationnellement, rendrait compte aussi bien de la répulsion observée que de la direction équatoriale.

Cette propriété se trouverait rattachée à d'autres actions dues à l'action des courants électriques et sur lesquelles nous reviendrons ultérieurement.

Mais des expériences de Faraday et de Becquerel présentent le phénomène sous un autre point de vue très digne d'intérêt. Il résulte, en effet, de mesures effectuées, que l'action magnétique ou diamagnétique exercée par un aimant sur un corps dépend en partie du milieu dans lequel il est plongé. Par exemple, une dissolution de sulfate de fer enfermée dans un tube de verre suspendu par son milieu et plongée dans une dissolution du même sel peut présenter des phénomènes variables : il n'y a aucune action si les deux liquides sont au même degré de saturation; il y a apparence de magnétisme si le tube renferme une dissolution plus concentrée que le liquide ambiant, et il y a diamagnétisme dans le cas contraire.

Cette expérience peut conduire à l'explication suivante : l'action exercée par un pôle d'un aimant sur un corps est la différence entre l'action absolue qu'il produirait et celle qu'il produirait sur la portion du corps constituant le milieu ambiant qui remplirait l'espace occupé par le corps considéré. L'effet définitif dépendra de la grandeur relative de ces deux actions : si l'action exercée sur le corps est la plus grande, la force observée sera de même sens et égale à la différence arithmétique; elle sera nulle si les deux actions sont égales; elle sera de sens contraire à l'action absolue exercée sur le corps considéré, si celle-ci est plus faible. Autrement dit, en admettant que l'attraction soit la règle générale, il y aura attraction (magnétisme) si le corps considéré est *plus* magnétique que le

milieu ambiant; il y aura répulsion (diamagnétisme) si le corps est *moins* magnétique que le milieu ambiant; il n'y aura aucune action si le corps est aussi magnétique que le milieu ambiant.

L'effet qui se manifesterait alors serait analogue à celui qui se produit quand on considère l'action de la pesanteur sur un corps plongé dans un liquide : la force résultante est descendante, ascendante ou nulle, suivant que le corps plongé a une densité supérieure, inférieure ou égale à celle du liquide.

Il faut remarquer cependant que cette explication présente quelques difficultés : ainsi on trouve que certains corps sont encore diamagnétiques dans le vide, soit que l'on ait fait l'expérience directement, soit que l'on ait effectué par le calcul la correction de l'effet du milieu ambiant. Pour pouvoir appliquer dans ce cas l'explication précédente, il faudrait admettre que le vide même constitue un milieu magnétique, ce qui ne se comprend pas très nettement.

Nous laissons de côté l'action des aimants sur les corps cristallisés : il y a une série de faits qui ne sont pas sans intérêt, mais qui nous entraîneraient fort loin et qui, jusqu'à présent au moins, ne paraissent pas pouvoir donner lieu à des applications pratiques.

37. Procédés d'aimantation. — Nous n'insisterons pas sur les procédés d'ai mantation dont la théorie est mal connue : nous n'en dirons que quelques mots, renvoyant, d'ailleurs, à un autre chapitre l'un des modes d'aimantation les plus intéressants, l'aimantation par les courants.

1° *Methode de la simple touche.* — On frotte un barreau d'acier NS (fig. 18), d'une extrémité à l'autre et toujours dans le même sens, avec le même pôle, N′ par exemple, d'un aimant naturel ou artificiel.

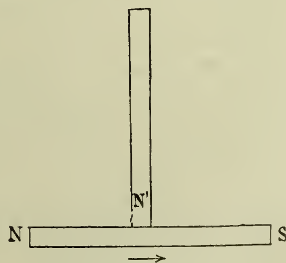


Fig. 18.

2° *Méthode de la double touche.* — Deux aimants sont placés sur le barreau d'acier, de telle sorte que leurs pôles de noms contraires soient en contact avec ce barreau mais restent séparés l'un de l'autre par une petite cale en bois (fig. 19) : ces aimants sont inclinés sur le barreau à aimanter de 42°, angle que, par des expériences comparatives, Æpinus a trouvé le meilleur. Le système des deux aimants est appliqué au milieu du barreau; on le fait glisser vers une extrémité, puis on l'entraîne en sens inverse

jusqu'à l'autre extrémité et ainsi de même un certain nombre de fois, en ayant soin pour plus de régularité de revenir s'arrêter au

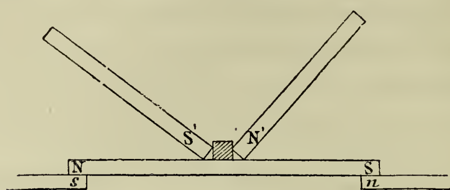


Fig. 19.

milieu après une dernière demi-course de même sens que la demi-course initiale.

3° *Méthode de la touche séparée.* — Deux aimants sont placés, par leurs pôles opposés, sur le milieu du barreau à aimanter et sous un angle de 30° (fig. 20); puis, les séparant, on les fait glisser en sens contraire jusqu'à ce qu'ils soient parvenus aux extrémités : on les enlève alors pour les ramener au milieu et recommencer la même opération que l'on répète un certain nombre de fois.

Dans les deux derniers cas, on arrive à des résultats beaucoup plus satisfaisants, si le barreau à aimanter repose à ses deux extrémités sur des pôles opposés d'autres aimants, pôles disposés en *s* et *n*, comme l'indiquent les figures 19 et 20, dans le même sens que les pôles des aimants que l'on fait mouvoir.

Dans tous les cas, on obtient, à chaque extrémité, un pôle de nom

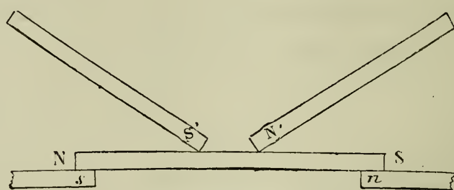


Fig. 20.

contraire à celui de l'aimant sur lequel elle reposait ou avec lequel elle était en contact.

38. — Nous avons dit que le fait, pour un barreau de fer ou d'acier, d'être placé parallèlement à un aimant fait naître, par influence, des pôles dans le barreau; en général ces pôles ne persistent pas, et le barreau retombe à l'état naturel. Mais s'il s'agit d'un barreau d'acier, et que pendant qu'il est soumis à l'influence,

on vienne à lui faire subir quelques actions mécaniques énergiques, comme des torsions, des chocs de marteau, etc., il conservera une partie de son aimantation.

Des résultats tout à fait analogues se produisent par l'action de la terre et l'on trouve à l'état d'aimant toutes les pièces d'acier qui, placées dans le méridien magnétique, ont été soumises à des actions mécaniques énergiques, ou seulement à des vibrations répétées. Cet effet d'aimantation est tout à fait analogue au précédent et est dû à l'influence de l'aimant terrestre.

39. — L'action magnétique maxima que peut produire un barreau d'acier aimanté dépend de sa trempe : on peut dire d'une manière générale qu'elle est d'autant plus considérable que le barreau est plus fortement trempé, ainsi que Coulomb l'a reconnu ; il est cependant prouvé maintenant que la question n'est pas tout à fait aussi simple.

L'action magnétique diminue quand la température s'élève, et la diminution est très notable ; cependant, on a pu obtenir des barreaux aimantés en les soumettant à l'action d'aimants puissants alors qu'ils étaient portés à la température rouge. D'après M. S. Dufour, l'action magnétique exercée par un barreau serait maxima à la température à laquelle il aurait été aimanté. Ajoutons que ces questions sont assez obscures encore.

D'un autre côté, la force d'un aimant dépend de sa forme et de ses dimensions : Coulomb a reconnu que les moments magnétiques de barreaux de même forme, aimantés à saturation, sont à peu près proportionnels aux cubes des dimensions homologues.

Si l'on considère, au contraire, des aimants de même section mais de longueurs différentes, on reconnaît (Coulomb, Jamin) que les courbes d'intensité magnétique, et par conséquent la quantité de magnétisme libre, varient fort peu de forme et de grandeur ; seulement, si le barreau est long, ces courbes ne commencent pas dès son milieu et présentent un espace neutre assez étendu, tandis que pour une longueur moindre, les deux courbes se rejoignent de manière à ne présenter qu'une ligne neutre et non une zone neutre ; enfin, pour de plus faibles longueurs encore, les courbes se modifient, les surfaces diminuent et, par suite, les quantités de magnétisme libre. M. Jamin appelle les premiers *mégapolaires* et les derniers *brachypolaires*.

Coulomb a étudié des aimants composés ; il prit 16 lames égales d'acier, les aimanta à saturation et les superposant en nombres variables, il évalua la force du barreau complexe ainsi

formé en déterminant la force de torsion nécessaire pour écarter chaque faisceau de 30° du méridien magnétique. Il obtint les résultats suivants :

Nombre des lames	1	2	4	6	8	12	16
Angles de torsion	82°	125°	150°	172°	182°	205°	229°

On voit que la force directrice croît moins rapidement que le nombre des lames. Coulomb attribuait ce résultat à des influences réciproques des lames les unes sur les autres, influences qui auraient pour effet de diminuer la force magnétique des lames intérieures; il vérifia d'ailleurs qu'il y avait là une action permanente, car en séparant le faisceau, et opérant comme précédemment, il trouva que les angles de torsion nécessaires pour écarter chaque lame de 30° du méridien magnétique étaient respectivement, en allant du centre au milieu, de 48°, 36°, 35°, 33°, 34°, 38°, 35° et 31°. Il importe de remarquer qu'outre cette action qui subsistait, il y en avait une autre provenant de la superposition des lames, car la torsion de 229° lorsqu'elles étaient toutes réunies ne correspondait qu'à une torsion moyenne de 14°, 3 pour chaque lame, nombre inférieur à ceux obtenus pour les lames séparées.

Coulomb a obvié à cet inconvénient, dans une certaine mesure, en plaçant les lames à quelque distance les unes des autres, et en les prenant de longueurs inégales, celles du milieu étant les plus longues, ces lames, à leurs extrémités, étant enchâssées dans des pièces de fer doux constituant un épanouissement de la région polaire des lames.

M. Jamin, dans des recherches suivies, a infirmé un certain nombre des résultats de Coulomb : il a trouvé, par exemple, que les inégalités observées par Coulomb dans le magnétisme des lames provenant d'un faisceau magnétique démonté, n'existent pas quand les lames d'acier ont une composition et une trempe identiques. Il a reconnu que la force d'un faisceau est d'abord proportionnelle au nombre des lames, puis croît de moins en moins au delà d'un certain nombre et jusqu'à une limite au delà de laquelle il est inutile d'augmenter le nombre des lames.

M. Jamin, s'appuyant sur des recherches que nous ne pouvons développer ici, a construit des aimants dits feuilletés qui possèdent une grande intensité et qui sont fort employés maintenant : ils ont généralement la forme d'un fer à cheval (fig. 21) et se terminent par deux armatures en fer doux réunies par une longue bande d'acier aimanté, en dedans de laquelle on place d'autres bandes aimantées

qui s'appliquent sur la première et qui ont des longueurs telles qu'elles s'appuient par leurs extrémités sur l'armature de fer doux.

40. — Nous avons dit que Coulomb recommandait de terminer les faisceaux aimantés par des parties de fer doux, formant des armatures polaires. Nollet a employé des armatures de forme et de disposition un peu différentes terminées par des pièces parallèles ou *pieds*. Ces pieds pouvaient soutenir un même *portant* de fer doux auquel on accrochait les poids à supporter : il obtenait ainsi un accroissement remarquable : un faisceau artificiel ainsi armé pouvait soulever un poid *six* fois plus considérable que celui que pouvait supporter un seul pôle.

Ajoutons, sans insister, que les aimants naturels, pour produire

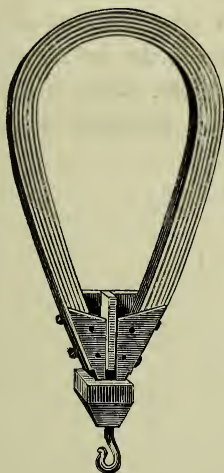


Fig. 21.

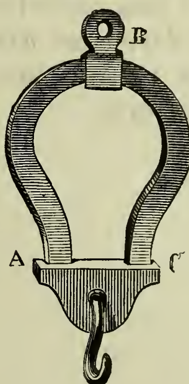


Fig. 22.

des effets un peu considérables, doivent être *armés* d'une manière analogue.

Lorsqu'il s'agit d'étudier ou d'utiliser la force portative d'un aimant, on conçoit qu'il y a intérêt à faire servir les deux pôles : la forme en fer à cheval (fig. 22) convient alors parfaitement. Un *portant* en fer doux A C s'applique sur les extrémités; il porte un crochet auquel on suspend un récipient dans lequel on met des poids. Il y a, dans ce cas, une action assez complexe, dans laquelle le fer doux, après avoir été aimanté par influence, réagit à son tour sur l'aimant pour augmenter son influence. Aussi observe-t-on que, dans une certaine limite, la force portative croît avec le temps et que l'on peut augmenter progressivement le poids supporté. Mais

si, par une augmentation trop considérable, on a détaché le portant, on perd l'excès de force portative que l'on avait acquis.

C'est par suite d'actions et de réactions du même genre que l'on s'explique l'emploi des armatures que l'on adapte aux barreaux

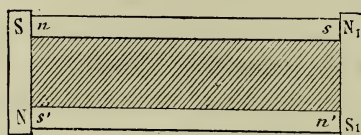


Fig. 23.

aimantés rectilignes (fig. 23) : ces barreaux *ns*, *n's'* sont réunis par couple, dans des boîtes, parallèlement, à une certaine distance et placés en sens contraire, et des morceaux de fer doux NS, N_1S_1 viennent s'appliquer contre leurs extrémités. Comme dans le cas précédent, ces fers doux s'aimantent par influence et réagissent sur les barreaux.

ÉLECTRICITÉ

Des corps divers placés dans des conditions très variées sont susceptibles de manifester des effets qui, tout d'abord, ne paraissent présenter aucune relation et que l'on peut assez facilement diviser en deux groupes; ces effets avaient été primitivement attribués à deux agents distincts, l'*électricité* et le *galvanisme*. Une étude plus complète, une analyse plus détaillée des phénomènes ont montré bue l'on pouvait admettre une cause commune à tous ces effets, cause à laquelle, sans rien spécifier quant à présent, nous conserverons le nom d'*électricité*. Les corps qui sont soumis à cet agent dont la nature nous est d'ailleurs inconnue, peuvent être étudiés à deux états : soit lorsqu'ils sont parvenus à l'état d'équilibre électrique, soit pendant la période (qui peut se prolonger pendant fort longtemps) qui sépare deux états d'équilibre. L'étude du premier état devrait correspondre à ce que l'on appelle l'*électricité statique*, et celle du second à l'*électricité dynamique*. Mais les phénomènes qui se rapportent à la période qui sépare deux états d'équilibre électrique ont été divisés en général : ceux qui se produisent pendant un temps très court ont été rattachés à l'électricité statique, et l'on a placé dans l'électricité dynamique seulement les faits qui se manifestent pendant une période plus ou moins longue et qui sont intéressants surtout par leur continuité. Nous adopterons cette division généralement acceptée qui ne présente aucun intérêt particulier, mais qui est sans inconvénient.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

41. Propriétés générales des corps électrisés. — Corps bons conducteurs, corps mauvais conducteurs. — Certains corps acquièrent, par le frottement, la propriété, qu'ils conservent pendant un temps plus ou moins long, d'attirer les corps légers : il en est ainsi du

verre, du soufre, de la cire d'Espagne, du caoutchouc durci, de l'ambre jaune (en grec ἤλεκτρόν: on dit alors que ces corps sont électrisés.

On vérifie plus facilement qu'un corps est électrisé en l'approchant d'un *pendule électrique*, appareil composé d'une boule de sureau suspendue à l'extrémité d'un fil fin attaché d'autre part à un support, et qui est déviée de la verticale lorsque l'on en approche un corps électrisé, cette déviation étant la conséquence de l'attraction qui se manifeste. On reconnaît facilement que l'attraction diminue d'intensité lorsque la distance augmente.

Des expériences faciles à concevoir montrent qu'un corps peut devenir électrisé par son contact avec un autre corps préalablement électrisé : c'est l'*électrisation par contact.*

Tous les corps peuvent s'électriser par le frottement, mais à cet égard ils présentent des différences dans la manifestation des effets produits. Lorsque l'on frotte un bâton de résine, de soufre, etc., sur une certaine zone, il présente la propriété électrique sur la zone frottée, mais sur cette zone seulement. De même il acquiert la même propriété si on le met en contact avec un autre corps préalablement électrisé, mais la propriété reste limitée aux points touchés. Imaginant, par assimilation, que cette propriété est la conséquence de la présence d'un agent matériel, on dit que ces corps s'opposent au passage de l'*électricité*, qu'ils sont *mauvais conducteurs* de l'électricité, en désignant sous le nom d'électricité la cause inconnue de ces phénomènes.

Si, au contraire, on prend un cylindre métallique, supporté par un pied en verre, en résine, ou soutenu par des fils de soie, en un mot par un corps mauvais conducteur, et si on le met en contact en un point avec un corps préalablement électrisé, on reconnaît que le métal est électrisé dans tous ses points, comme si l'électricité avait pu, comme un agent matériel, se répandre dans tout le corps: on dit, pour cette raison, que les métaux sont *bons conducteurs* de l'électricité. (Tableau II.)

Des expériences, souvent répétées autrefois d'une manière tout analogue, ont montré que le corps de l'homme est un bon conducteur.

Si dans les expériences précédentes, le cylindre métallique touche un corps bon conducteur, de forme et de dimensions quelconques, mais qui, sans interruption, soit prolongé jusqu'au sol, non seulement il est impossible d'électriser le métal; mais si, préalablement il était électrisé, il perd immédiatement cette pro-

priété : tout se passe comme si, agent matériel, l'électricité se perdait dans le sol. On désigne souvent pour cette raison la terre sous le nom de *réservoir commun*.

On voit dès lors que l'air sec dans lequel les expériences d'électricité réussissent très bien doit être un corps mauvais conducteur, et l'on peut concevoir que si ces expériences manquent le plus souvent quand le temps est humide, c'est que la vapeur d'eau contenue dans l'air est un bon conducteur.

On conçoit que les corps bons conducteurs ne peuvent ordinairement acquérir la propriété électrique par le frottement; car alors qu'ils l'acquièrent en un point, elle se répand dans toute leur étendue et par l'intermédiaire du corps de l'expérimentateur se répand dans le sol où elle se perd. C'est ce qui explique que ces corps étaient classés autrefois sous la dénomination de corps *anélectriques*.

42. Corps diversement électrisés. — Attraction et répulsion. — La propriété d'attirer les corps légers est commune à tous les corps électrisés; mais on peut manifester, d'autre part, des différences ainsi que le montrent les expériences suivantes :

Prenons un pendule électrique isolé, constitué par une balle de sureau suspendue à un fil de soie qui, pour plus de sécurité, est attaché à une tige de verre : d'autre part ayons un bâton de verre et un bâton de résine, électrisés l'un et l'autre, ce que l'on vérifiera en s'assurant que l'un et l'autre attirent la balle de sureau. Approchons la résine du pendule, assez pour que l'attraction amène le contact et retirons-la; la balle sera électrisée par contact et l'on pourrait s'en assurer en vérifiant qu'elle attire un autre pendule, par exemple. Si alors nous approchons de nouveau la résine, nous reconnaissons que bien loin d'être attirée, la balle de sureau est *repoussée* nettement; donc, au moins dans certains cas, un corps électrisé agit sur un corps électrisé autrement qu'il ne ferait sur un corps non électrisé. Mais si, de la même balle ainsi préalablement électrisée, nous approchons le bâton de verre électrisé, nous observons une attraction, attraction plus vive même que si la balle n'avait pas été électrisée.

Ainsi le verre et la résine, l'un et l'autre électrisés, présentent cependant des différences essentielles puisque l'un repousse un corps que l'autre attire. Cette différence n'est pas spéciale à ces deux substances et si du même pendule électrisé nous approchons une série de corps électrisés aussi, nous reconnaîtrons que les uns se comportent comme le fait la résine, tandis que les autres agissent

comme le verre. A ce point de vue, on divise les corps en corps électrisés *résineusement* et corps électrisés *vitreusement* suivant que leur action est la même que celle de la résine ou que celle du verre.

Ces définitions sont justifiées parce que l'expérience prouve que lorsque, dans une circonstance quelconque, on aura vérifié qu'un corps électrisé se comporte comme la résine par exemple, il se comporte de la même façon dans toutes les autres circonstances où on peut l'étudier.

43. — On désigne souvent les corps électrisés vitreusement ou résineusement en disant qu'ils sont électrisés *positivement* ou *négativement*. — Ces dénominations, qui correspondent à des idées que nous développerons par la suite, sont d'ailleurs justifiées dès à présent, l'opposition du sens des actions exercées par ces corps étant valablement caractérisée par l'opposition des signes, comme en algèbre.

Nous venons de dire que le pendule électrisé résineusement est repoussé par la résine électrisée et attiré par le verre électrisé. L'expérience doit se compléter comme il suit : le pendule ayant été touché avec les doigts de manière à lui enlever la propriété électrique, à le *décharger*, on en approche le bâton de verre électrisé jusqu'au contact; on reconnaît que la balle de sureau, qui est alors électrisée, est repoussée par le verre électrisé, mais qu'elle est attirée par la résine électrisée. Comme nous l'avons dit d'ailleurs d'une manière générale tout à l'heure, tous les corps qui, dans la première expérience, se comportaient comme le verre, comme lui aussi repoussent la balle de sureau, tandis que les autres électrisés résineusement l'attirent.

En remarquant que, comme l'expérience le prouve, les corps au contact s'électrisent semblablement, les résultats énoncés ci-dessus peuvent être résumés dans l'énoncé suivant :

Les corps électrisés semblablement se repoussent; les corps électrisés contrairement s'attirent.

44. Influences électriques. — Les attractions et répulsions ne sont pas les seules actions produites par les corps électrisés; il y a également à signaler spécialement les phénomènes d'*influence.*

Soit un corps conducteur NP (fig. 24) placé sur un support isolant et duquel nous approchons un corps électrisé M; par ce fait seul, des actions électriques se produisent sur NP, ce qui pourra être rendu manifeste par l'observation de petits pendules doubles qu'on y aura suspendus et qui s'écarteront aussitôt. En en approchant des corps différemment électrisés on reconnaît que la partie N, voisine

de M, est électrisée contrairement à M, tandis que l'extrémité P est électrisée semblablement à M. On dit alors que le conducteur NP est électrisé par *influence*. L'effet observé subsiste tant que le corps M reste électrisé en présence de NP, si toutefois l'air est sec : mais il disparaît immédiatement et totalement si l'on éloigne M ou si on le décharge en le mettant en communication avec le sol. (Il n'en se-

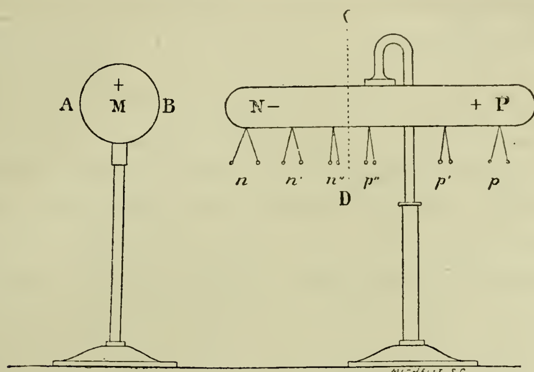


Fig. 24.

rait pas de même dans le cas où l'air étant humide, il y aurait des pertes.)

Si le corps NP est mis en communication avec le sol (fig. 25), soit que cette communication existe avant l'action de M ou qu'elle soit établie seulement alors que M a produit l'effet d'influence, et quel que soit

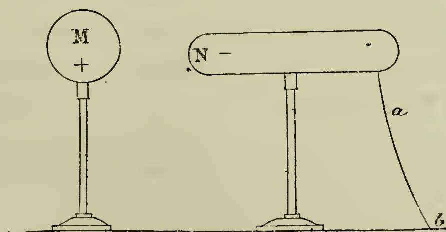


Fig. 25.

le point de NP par lequel elle ait lieu, on observe que l'extrémité P cesse d'être électrisée; en N, au contraire, l'électrisation subsiste; si les circonstances sont favorables, on peut même reconnaître que l'électrisation est plus énergique. Enfin, si on rompt la communication avec le sol et que, ensuite, on éloigne ou qu'on décharge le corps M, on reconnaît que le corps NP reste électrisé, seulement

l'électrisation se manifeste aussi bien aux deux extrémités et partout où on l'observe, elle est de nom contraire à celle de M.

Il importe absolument de remarquer que l'influence est un phénomène réciproque et que, lorsque l'on met en présence deux corps dont l'un au moins est électrisé, la distribution sur chacun d'eux est autre que ce qu'elle serait s'il était seul. Dans le cas où l'un des corps a une très petite masse par rapport à l'autre, on peut cependant négliger l'action qu'il produit et admettre qu'il soit seul influencé.

L'influence peut se manifester dans des conditions plus complexes : par exemple, lorsque, à la suite d'un conducteur isolé NP (fig. 26) influencé par un corps électrisé M, on en place un second RS, celui-ci présente, quoique à un moindre degré, les mêmes phénomènes que NP, les électrisations se manifestant avec la même orientation.

45. Théories de l'électricité. — Hypothèse d'un seul fluide. —

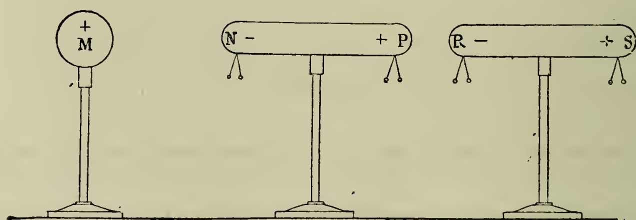


Fig. 26.

On a imaginé plusieurs théories destinées, en partant d'hypothèses simples, à donner l'explication des phénomènes électriques : deux hypothèses ont surtout été développées, celle de Symmer qui imaginait deux fluides électriques et celle de Franklin que nous adoptons.

Nous admettrons l'existence d'un agent impondérable sur la nature intime duquel on n'est pas encore fixé et sur lequel il est inutile à cet égard de nous prononcer. Nous désignerons cet agent sous le nom d'*électricité* ou de *fluide électrique*. Cet agent existe sur les corps et dans l'espace en quantités quelconques, mais déterminées pour chacune des circonstances que nous avons à considérer. De plus, à la suite de certaines actions, un corps peut en contenir *plus* ou *moins* que ce qui correspond à cette quantité normale; dans le premier cas, nous dirons que le corps est électrisé *en plus* ou *positivement :* nous admettrons que c'est le cas du verre qui a été frotté avec de la laine; dans le second cas, le corps est électrisé *en moins* ou

négativement, comme la résine frottée avec une peau de chat.

Ajoutons que l'électricité paraît se mouvoir avec la plus grande facilité sur certains corps, les bons conducteurs, tandis qu'elle éprouve une grande résistance sur les mauvais conducteurs.

La terre, à cause de sa grande masse, contient une quantité d'électricité qui n'est pas sensiblement influencée par celle qui peut lui être fournie ou retirée par les corps électrisés avec lesquels on la met en communication : c'est là ce qui explique le rôle de réservoir commun qu'elle joue.

Nous admettrons en outre que cet agent, ce fluide, est susceptible d'agir à distance par répulsion sur lui-même : et cette dernière considération montre que l'hypothèse que nous développons ne peut être considérée que comme transitoire et ne peut représenter l'intimité même des phénomènes, car on ne peut admettre comme cause première un agent manifestant son action à distance.

46. — Il faut que cette hypothèse soit d'accord avec les faits généraux que nous venons d'indiquer, qu'elle en donne l'explication; ce n'est qu'à cette condition que nous pourrons être conduit à l'utiliser pour l'appliquer aux propriétés que nous aurons à signaler par la suite.

Nous dirons d'abord que l'attraction des corps légers n'est pas un phénomène simple et que nous ne pourrons en donner l'explication que plus tard : mais nous pouvons nous rendre compte de l'électrisation par frottement, de l'électrisation par contact, des attractions et répulsions des corps électrisés, de l'influence électrique, ainsi que nous allons l'indiquer.

Le frottement ne produit pas l'électricité, il en change seulement la répartition; par suite de cette action, une partie de cet agent quitte l'un des corps, qui est alors électrisé négativement, et se porte vers l'autre qui devient électrisé positivement.

Le fait de l'électrisation par contact s'explique également : deux corps qui sont à des états électriques différents tendent à se mettre à l'état d'équilibre électrique ; si l'un des deux n'est pas électrisé, s'il contient la quantité d'électricité qui correspond à l'état normal et qu'on le touche avec un corps isolé contenant au contraire de l'électricité en proportions différentes que celle qui doit exister à l'état normal, après le contact, s'ils sont conducteurs, le premier gagnera ou perdra de l'électricité, et par suite s'électrisera en plus ou en moins, tandis que l'autre se rapprochera de l'état normal et sera moins électrisé, par conséquent.

47. — Les attractions et répulsions des corps électrisés présentent

dans la théorie classique de Franklin quelques difficultés dans l'explication, difficultés qui ont été l'une des principales causes de son rejet : ces difficultés n'existent pas si l'on imagine que le milieu ambiant, comme les corps, contient une certaine quantité d'électricité et que, comme il semble arriver pour le magnétisme et le diamagnétisme et comme cela se présente pour la pesanteur dans le cas des corps plongés dans un liquide (principe d'Archimède), l'action produite sur un corps par un autre corps n'est que la différence entre l'action exercée réellement sur l'électricité du corps et celle qui serait exercée sur la masse du milieu ambiant qui occuperait la place du corps, si celui-ci ne s'y trouvait pas.

En appliquant ces considérations à des points matériels on arrive facilement[1] à se rendre compte des phénomènes d'attraction et de répulsion et l'on voit que ces actions sont déterminées par la différence en plus ou en moins entre l'électricité que possède un corps et celle qu'il posséderait s'il était à l'état normal.

1. Considérons un point matériel électrisé A (fig. 27), c'est-à-dire contenant en plus de la quantité normale d'électricité e qu'il doit contenir, une quantité a, de telle sorte qu'il possède $e + a$ d'électricité : a sera positif si le corps est électrisé positivement, il sera négatif dans le cas contraire. Si ce point est isolé dans l'espace, il restera immobile, les actions qu'il éprouve de la part de tous les autres points se détruisant par raison de symétrie.



Fig. 27.

Supposons que dans le voisinage on place un autre point matériel B dont ε serait la quantité normale d'électricité, et qui contiendrait une quantité $\varepsilon + \alpha$ de cet agent, α pouvant comme a être positif ou négatif. Concevons, par la pensée, un espace B′ symétrique de B par rapport à A et contenant la quantité normale d'électricité ε.

Quelles seront maintenant les actions subies par A ? Il est clair que celles produites par l'espace entier sauf B et B′ se détruisent par raison de symétrie, comme ci-dessus, et que nous n'avons à nous préoccuper que des effets dus à B et à B′.

Si nous appliquons la loi qui sera vérifiée plus loin (p. 51) que les actions sont proportionnelles aux produits des quantités d'électricité, on verra que l'action de B sur A peut se présenter par $k\,[(\varepsilon + \alpha)\,(e + a) - (\varepsilon + a)e]$, k étant une constante dépendant, entre autres éléments, de la distance. La répulsion exercée par B′ sera pour les mêmes raisons $k\,[\varepsilon\,(e + a) - \varepsilon e]$, la constante k ayant la même valeur que ci-dessus puisque la distance est la même.

Ces deux répulsions de B sur A et de B′ sur A agissent en sens contraire : elles donnent donc une résultante égale à leur différence. Soit F cette résultante : convenons de compter comme positives les forces tendant à approcher A de B, nous aurons alors :

$$F = -k\,[(\varepsilon + \alpha)\,(e + a) - (\varepsilon + \alpha)\,e] + k\,[\varepsilon\,(e+a) - \varepsilon e].$$

Il résulte du calcul que la grandeur des actions dépend non de la quantité absolue d'électricité que contiennent les corps, mais seulement de la différence en plus ou en moins avec la quantité d'électricité qu'ils posséderaient s'ils étaient à l'état d'équilibre avec le milieu ambiant : ce sont désormais ces différences que nous appellerons *charge électrique*, *quantité* d'électricité dont un corps est chargé, cette quantité pouvant être positive ou négative.

Il résulte de là qu'un point qui ne contient que la quantité d'électricité que contiendrait la masse ambiante du milieu dont il tient la place ne peut produire aucune action ; nous dirons dans ce cas que le corps est à l'*état neutre.*

Les choses ne se passent pas aussi simplement lorsque l'on considère non des points, mais des corps électrisés : les attractions ou répulsions sont alors précédées d'actions d'influence qui jouent un grand rôle et peuvent changer les effets observés comme nous le dirons plus loin (71, 72).

48. — Les phénomènes d'influence s'expliquent simplement aussi : quand un corps électrisé est en présence d'un corps neutre, il y a action du premier sur les molécules du fluide qui agissent dans le second, les forces qui en résultent troublent l'équilibre du corps neutre et amènent une nouvelle distribution électrique. Si, par exemple, le corps influent est électrisé positivement, il agit sur le corps neutre pour repousser l'électricité du corps neutre qui, quittant l'extrémité voisine, tend à s'accumuler à l'extrémité opposée, électrisant ainsi cette dernière positivement, c'est-à-dire semblablement au corps influent, tandis que l'extrémité voisine devient néga-

Cette valeur devient, toutes réductions faites :

$$F = -k \alpha a.$$

On voit alors que le sens de la force F dépendra des signes de α et de a. Si α et a sont de même signe, tous les deux positifs, ou tous les deux négatifs, F sera négatif : c'est-à-dire que A tendra à s'éloigner de B, qu'il y aura répulsion si les deux corps sont tous les deux électrisés positivement, ou tous les deux négativement.

Mais si α est positif et a négatif, ou inversement, alors F sera positif : il y aura attraction, et le corps A se rapprochera de B si B est électrisé positivement et A négativement, ou si inversement B est électrisé négativement et A positivement.

Les phénomènes d'attraction et de répulsion des corps électrisés s'expliquent donc complètement et sans difficulté dans l'hypothèse d'un seul fluide électrique.

On remarquera que, bien que les répulsions élémentaires soient proportionnelles aux quantités totales d'électricité $e + a$ et $\varepsilon + \alpha$, quantités que l'on ne connaît pas, les forces résultantes observées sont proportionnelles seulement à a et α, c'est-à-dire aux quantités qui mesurent les différences observables expérimentalement entre l'état électrique des corps et l'état ambiant.

tive : ce sont bien là les effets généraux de l'influence. On comprend d'ailleurs que cette nouvelle distribution fait naître des forces qui agissent à leur tour sur l'électricité et l'on reconnaît facilement qu'elles agissent en sens contraire de celles émanées du corps influent, ce qui explique pourquoi l'on arrive à un état nouveau d'équilibre.

Ces questions, et d'autres qui se rattachent à l'influence, seront étudiées plus tard avec quelque détail; il nous suffisait maintenant de montrer que l'hypothèse que nous adoptons donne une explication plausible des phénomènes généraux que nous avons signalés.

49. — Sans y attacher une importance trop grande, il peut n'être pas sans intérêt de montrer par deux comparaisons, que nous aurons d'ailleurs l'occasion de développer ultérieurement, quelle est l'idée générale de cette hypothèse : l'une de ces comparaisons est matérielle et un peu grossière, mais elle est, par là même, assez frappante.

On peut considérer les corps comme des vases, des réservoirs contenant un même liquide : dans l'état normal, les surfaces du liquide dans tous les vases sont de niveau, sur un même plan horizontal; on peut, par des moyens divers, élever le niveau dans certains vases, l'abaisser dans d'autres : cette action correspondrait à l'électrisation positive, ou en plus, et à l'électrisation négative, ou en moins. Si l'un des vases est infiniment grand par rapport aux autres, en le réunissant à l'un de ceux-ci qui ne soit pas au même niveau, il n'y aura pas cependant de variation sensible, appréciable, dans ce grand réservoir, réservoir commun.

On peut encore établir une comparaison entre la chaleur et l'électricité; tous les corps contiennent une certaine quantité de chaleur, et l'équilibre de température existe quand cette chaleur est répartie d'une certaine manière déterminée : la chaleur n'a alors aucune tendance à passer d'un corps à l'autre. Mais l'équilibre est détruit si la chaleur est autrement répartie, aussi bien si certains corps possèdent moins de chaleur que la quantité normale que si, au contraire, ils en contiennent davantage. Il se manifestera alors des phénomènes particuliers dus à l'existence de cette différence. D'ailleurs si l'un des corps a une masse infiniment grande par rapport aux autres, on pourra, sans qu'il éprouve de modifications appréciables, le mettre en contact avec un corps à une autre température qui sera ramené à la température de ce corps de masse infinie.

Il ne faut pas attacher, d'ailleurs, une importance exagérée à ces comparaisons qui, si elles permettent de se représenter les actions

qui se produisent au contact, ne s'appliquent pas bien, ou même ne s'appliquent pas aux actions à distance.

50. Quantités d'électricité. — Balance de Coulomb. — On observe que deux corps matériellement identiques et électrisés peuvent ne pas produire avec la même intensité les effets qu'ils provoquent : on exprime ce résultat en disant que leurs charges électriques, positives ou négatives (47), correspondent à des *masses* inégales, à des *quantités* inégales d'électricité. Ces masses ou quantités sont dites égales, au contraire, si les effets observés sont égaux.

Si l'on accepte l'idée d'un agent électrique spécial, plus ou moins analogue à un fluide matériel, qui ne puisse ni être créé ni être détruit, on peut concevoir sans difficulté ce que sont des masses d'électricité qui sont égales ou qui se trouvent dans un rapport donné. Il est évident en effet que si l'on vient à toucher une sphère conductrice isolée et électrisée avec une autre sphère identique, chacune d'elles après la séparation aura la moitié de la quantité d'électricité que possédait la première avant le contact. De même, on arriverait à avoir le $\frac{1}{3}$, le $\frac{1}{4}$ de la quantité d'électricité répartie sur une sphère, en la touchant avec 2, 3 sphères identiques; on serait ainsi conduit à concevoir deux masses électriques qui seraient dans un rapport quelconque.

Il est préférable de définir les quantités d'électricité en les supposant proportionnelles aux effets qu'elles produisent, par exemple aux forces attractives ou répulsives qu'elles développent dans les mêmes circonstances. Ainsi, on dit que deux masses électriques sont égales, sont dans le rapport de p à q, lorsque, agissant sur le même point matériel électrisé de la même façon et placé à la même distance, elles produisent des forces qui sont égales, ou qui sont dans le rapport de p à q.

On vérifie expérimentalement, d'ailleurs, que les résultats obtenus sont les mêmes, que l'on se place à l'un ou à l'autre point de vue.

51. — Bien que l'on puisse imaginer divers appareils qui permettraient d'effectuer les mesures de forces électriques, c'est généralement, au moins jusqu'à ces derniers temps, de la *balance de torsion* que l'on a fait usage. Cet appareil, que l'on désigne aussi sous le nom de balance de *Coulomb*, est basé sur le principe que nous avons indiqué précédemment (14) et, à quelques modifications près, ressemble à la balance de torsion employée dans l'étude du magnétisme (fig. 28). Ici seulement l'aiguille aimantée est remplacée par une aiguille de gomme laque AB suspendue en son milieu, et portant à son extrémité un petit disque de clinquant ou souvent une petite

sphère métallique. Cette aiguille n'a pas de direction spontanée et prend celle qui correspond à une torsion nulle : on s'arrange pour que dans cette position elle se trouve en face du zéro des divisions de la cage. A travers une ouverture pratiquée dans cette cage on peut introduire des conducteurs constitués par des anneaux ou des sphères métalliques D, D' réunis par une tige également conductrice recouverte d'un corps isolant, de verre ou de gomme laque, et disposée de telle sorte que la sphère inférieure se trouve au niveau de l'aiguille de gomme laque et en contact avec la boule de cette aiguille.

Supposons la boule fixe D électrisée d'une manière invariable et électrisons la boule mobile A semblablement : il y aura répulsion et la boule A s'arrêtera à une certaine position d'équilibre qui sera caractérisée par l'angle d'écart qu'on lira directement sur l'échelle divisée. L'équilibre a lieu au moment où la force répulsive est détruite par la force de torsion. (En réalité, il faudrait tenir compte non de la force, mais du couple de torsion ; par suite de la quasi-fixité du centre de l'aiguille de gomme laque, on peut, sans erreur sensible, considérer la force au lieu du couple.) Or celle-ci est proportionnelle à l'angle de torsion qui ici est égal à l'angle d'écart : soit α cet angle.

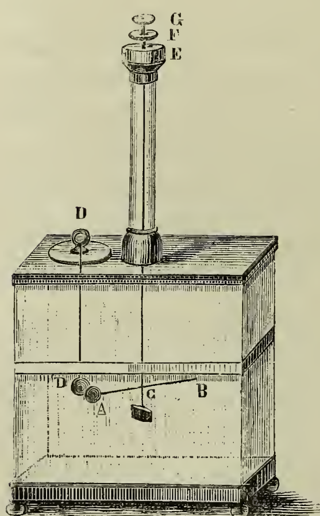


Fig. 28.

Pour une autre charge communiquée au conducteur fixe, l'aiguille de gomme laque éprouverait une déviation différente ; mais on peut toujours, en tournant le tambour supérieur dans un sens convenable, ramener la déviation, et par suite la distance, à être la même. L'angle de torsion donnera alors la valeur de la force de torsion et par suite la valeur de la force répulsive. On dira dans ce cas que les quantités d'électricité existant sur le conducteur D sont proportionnelles à ces forces répulsives, ou à ces angles de torsion.

Il importe de remarquer que l'appareil ne donne pas seulement des nombres proportionnels aux forces répulsives, mais qu'il permet d'évaluer ces forces d'une manière absolue, en milligrammes par

exemple, puisque l'on connaît la longueur du fil de suspension, son diamètre, le coefficient d'élasticité du fil, la longueur de l'aiguille AB et l'angle de torsion, ce qui permet d'appliquer la formule donnée en mécanique.

52. — On peut reconnaître, comme nous l'avons indiqué, que les quantités d'électricité définies par leurs effets, sont déterminées de la même façon qu'elles le seraient s'il s'agissait en effet d'un fluide indestructible.

Après avoir fait une mesure dans les conditions que nous venons d'indiquer, on touche alors la boule mobile A, par exemple avec une autre boule identique que l'on enlève et qui a dû prendre certainement la moitié de la charge électrique ; la répulsion diminue et les boules se rapprochent ; mais, pour opérer à la même distance, on agit sur le micromètre supérieur que l'on tourne d'un angle β tel que la boule A soit revenue en face de la division α; ici encore, l'angle de torsion, qui est égal à β-α, mesure la force de torsion, égale et contraire à la force répulsive, et l'on observe que cet angle est égal à la moitié de ce qu'il était précédemment.

On peut varier les conditions de l'expérience, et l'on voit que les forces répulsives sont, dans tous les cas, proportionnelles aux nombres que l'on serait conduit à considérer si l'on admettait que l'électricité est un fluide qui se partage effectivement entre les conducteurs en contact.

On peut opérer différemment, en conservant invariable l'état électrique de la boule mobile et faisant varier dans des rapports connus les charges électriques de la boule fixe. Comme on pouvait s'y attendre, à cause de l'égalité de l'action et de la réaction, on reconnaît que les forces répulsives, dans ce cas, obéissent aussi à la loi ci-dessus énoncée.

Enfin on peut vérifier expérimentalement que si les deux charges électriques varient, les forces répulsives à la même distance varient proportionnellement au produit des charges électriques ; ce qui d'ailleurs était évident.

Ajoutons encore que des expériences analogues peuvent se faire en plaçant les boules dans des états électriques opposés, ce qui produit alors une attraction ; seulement il faut que, lorsque le fil est sans torsion, la boule mobile soit assez loin de la boule fixe pour que l'attraction ne puisse les amener au contact. On trouve toujours les mêmes résultats.

Si e et e' représentent les quantités d'électricité dont sont chargés deux points et f la force qui se manifeste à une certaine distance, on a :

$$f = -kee',$$

formule dans laquelle k est une constante. La force sera attractive si le signe de f est $+$, elle sera négative en cas contraire.

Il n'est pas nécessaire, comme cela semblerait résulter de ce qui précède, que les points soient toujours à la même distance : il existe une relation entre l'intensité de la force et la distance, comme nous allons le dire.

53. — La balance de Coulomb permet d'étudier la loi qui lie les forces attractives et répulsives à la distance des corps électrisés. Il suffit, en effet, étant données les deux boules électrisées, de faire varier la torsion du micromètre supérieur pour changer la distance de ces boules : la valeur de la torsion totale donne la grandeur de la force attractive ou répulsive pour chaque distance. Coulomb a trouvé ainsi la loi suivante :

Les attractions et répulsions électriques varient en raison inverse du carré de la distance.

Cette loi et celle qui lie les attractions ou répulsions électriques aux quantités d'électricité (en définissant ces quantités, comme nous l'avons dit, indépendamment de ces forces) constituent les lois de Coulomb.

Quelles que soient les unités choisies, la force f qui agit entre deux quantités d'électricité e et e' à la distance d peut être représentée par :

$$f = -k\frac{ee'}{d^2},$$

k étant une constante. Mais on peut faire choix d'une unité de quantité d'électricité qui ramène cette expression à :

$$f = -\frac{ee'}{d^2}.$$

Il suffit de prendre pour unité de quantité d'électricité *la quantité qui, agissant sur une quantité égale, située à l'unité de distance, donne naissance à l'unité de force.*

Il importe de remarquer que, dans les expériences faites avec la balance de Coulomb, il faut employer des sphères d'assez petites dimensions pour que leur diamètre puisse être négligeable devant la distance qui les sépare. S'il en était autrement, il faudrait faire intervenir la variation de distribution produite dans chacune des sphères par l'influence de l'autre.

Dans les indications sommaires que nous donnons relativement

aux mesures électriques, il convient de tenir compte de la déperdition par l'air et par les supports.

54. Déperdition de l'électricité par les supports et par l'air. — Dans toutes les expériences relatives à l'électricité statique, il importe absolument de remarquer que la charge électrique n'est pas constante, quelque précaution que l'on prenne : l'air n'est jamais un isolant parfait et les supports laissent toujours passer une certaine quantité d'électricité. On conçoit que, dans les expériences relatives à des mesures ces pertes puissent avoir une importance réelle. Coulomb a cherché à simplifier la question par l'emploi d'un procédé qui permît d'avoir à faire une seule correction.

Après des expériences multipliées, il arriva à reconnaître que, pour une charge donnée, on peut toujours employer un support isolant assez long pour que l'on soit en droit de négliger son action propre. Pour arriver à ce résultat, on observe la variation de force répulsive dans une balance de Coulomb, d'abord quand la boule fixe est portée par un support, puis par deux supports identiques, par exemple des cylindres en gomme laque : l'addition d'un second support a seulement pour effet de remplacer une surface de déperdition par l'air par une égale surface de déperdition par la gomme laque. On recommence les observations en augmentant la longueur des supports jusqu'à ce que la déperdition ne varie pas par l'addition du second support.

On peut alors rechercher la loi de la déperdition par l'air en déterminant la valeur de la force répulsive en fonction du temps; mais, en réalité, il n'est pas nécessaire de connaître cette loi, pourvu que l'expérience ne dure pas trop longtemps et que les charges en présence ne soient pas trop considérables : on peut toujours alors, ainsi que cela se fait dans des circonstances analogues, remplacer la loi exacte par la loi de proportionnalité.

En particulier, si l'on a à comparer les charges électriques en deux points distincts A et B, on touche A avec le plan d'épreuve, puis portant celui-ci dans la balance, on observe une déviation α qui mesure la force répulsive. On vient ensuite avec le plan d'épreuve à toucher le point B et l'on note la déviation correspondante β. On ne peut comparer α à β, car les contacts n'ont pas eu lieu au même instant : il s'est écoulé un temps t entre ces deux contacts. Après un temps égal t, on touche de nouveau A et la balance de Coulomb donne une déviation α'. On peut admettre, en vertu de la loi approximative de proportionnalité, que le point A avait

une charge correspondant à $\frac{\alpha+\alpha'}{2}$ au moment où le point B avait une charge β.

55. Du plan d'épreuve. — La balance de Coulomb, qui permet de mesurer relativement ou même absolument les quantités d'électricité dont sont chargées soit la boule fixe, soit la boule mobile se prête également à la mesure des quantités d'électricité existant aux différents points d'un corps conducteur, c'est-à-dire à l'étude de la distribution de l'électricité; ce qui conduit à la détermination de la quantité d'électricité totale dont peut être chargé un corps. Nous nous occuperons d'abord des mesures relatives seulement, et nous montrerons ensuite comment on peut arriver à la mesure absolue.

On appelle *plan d'épreuve* un petit disque de clinquant ou une petite sphère métallique portée à l'extrémité d'une tige isolante : on touche avec cet appareil les divers points dont on veut connaître l'état électrique, le petit disque se charge par contact et l'on détermine son état en l'introduisant dans la balance de Coulomb à la place de D.

On démontre d'abord que le *plan d'épreuve*, en touchant un corps électrisé en un point, se charge proportionnellement à la quantité d'électricité qui existe en ce point : pour cela, on vérifie en premier lieu que le plan d'épreuve produit toujours la même répulsion dans la balance, quel que soit le point qu'il ait touché sur une sphère électrisée, corps sur lequel évidemment la distribution doit être uniforme. Puis, et ces mesures suffiraient seules, on prend des sphères égales chargées de quantités d'électricité qui sont successivement, par exemple, 1, $^1/_2$, $^1/_4$..., ce qu'on obtient, comme nous l'avons dit plus haut, en touchant une sphère électrisée avec une seconde non électrisée et ainsi de suite. On reconnaît que les forces répulsives observées sont également dans le rapport 1, $^1/_2$, $^1/_4$..., ce qui prouve que le plan d'épreuve avait emporté des quantités proportionnelles à ces mêmes nombres, proportionnelles par suite aux charges qui existaient aux points touchés.

On conçoit dès lors que l'on ait un moyen d'exploration des corps électrisés qui permet d'étudier la distribution dans tous les cas ; nous ne croyons pas utile de signaler toutes les expériences et toutes les recherches qui ont été faites à ce sujet et nous nous contenterons de donner quelques idées générales qui feront connaître les résultats essentiels.

56. L'électricité se porte a la surface des corps conducteurs. — Ce fait, qui peut être démontré comme une conséquence mécanique

des lois de Coulomb, a été vérifié expérimentalement de diverses façons.

Coulomb a trouvé que si l'on touche une sphère métallique pleine, portée sur un pied isolant et électrisée, avec une sphère creuse isolée et à l'état neutre, après le contact elles sont également électrisées et la charge de chacune d'elles est la moitié de la charge primitive. Le partage a donc eu lieu proportionnellement aux surfaces, qui sont égales, et non aux masses, qui sont inégales : il dépend donc seulement de la surface du corps.

On peut vérifier directement le fait à l'aide d'une sphère creuse montée sur un pied isolant et présentant une ouverture à sa partie supérieure. On l'électrise et à l'aide d'un plan d'épreuve on reconnaît que sa surface est électrisée ; mais si l'on porte le plan d'épreuve à l'intérieur, on ne trouve aucune trace d'électrisation.

Il existe beaucoup d'autres expériences qui vérifient ce résultat, mais celles que nous venons d'indiquer suffisent absolument.

57. Épaisseur, densité, tension de l'électricité. — Pour énoncer les résultats sous une forme simple, on peut avec Poisson imaginer que, en chaque point du corps étudié, on porte sur la normale une petite longueur proportionnelle à la charge mesurée : le lieu des extrémités de ces petites droites constitue une surface qui caractérise évidemment la distribution d'une manière symbolique. La distance de cette surface à la surface du corps en un point est dite l'*épaisseur électrique* en ce point. L'idée et l'expression viennent de l'assimilation de l'électricité à un fluide matériel qui se trouverait répandu à la surface du corps considéré. Coulomb employait une autre expression, en comparant l'électricité à un fluide qui formerait à la surface du corps une couche uniforme, mais dont la densité varierait d'un point à l'autre ; d'où l'expression de *densité électrique* au point considéré. L'épaisseur et la densité ne sont d'ailleurs connues que par la quantité au point considéré et sont, en conséquence, représentées par des nombres proportionnels ou par les mêmes nombres.

Lorsqu'un corps est en état d'équilibre électrique, on peut démontrer que toutes les forces agissant sur un point intérieur et émanées des divers points électrisés ont une résultante nulle ; mais il n'en est pas de même si l'on considère un point extérieur ou un point situé sur la surface. L'action totale sur un point extérieur pourrait être calculée par l'application des lois de Coulomb et la connaissance de la répartition de l'électricité sur le corps : on trouverait ainsi une force déterminée et quelconque, d'une manière générale.

Mais si l'on cherche l'action sur un point situé à la surface, on

reconnaît que, puisqu'il y a équilibre, la force doit être normale à la surface : si l'on imagine que le point qui subit cette action est chargé de l'unité d'électricité de même nom que celle du corps, il sera repoussé avec une certaine force qui est appelée la *tension électrique* au point considéré. On peut démontrer exactement que cette force est proportionnelle à l'*épaisseur* ou à la *densité* électrique en ce point, de telle sorte qu'elles peuvent être considérées comme ayant la même valeur relative.

L'existence de cette force peut être mise en évidence en approchant un petit pendule isolé d'un corps électrisé ; à peine aura-t-il touché ce corps qu'il sera repoussé. Dans ce cas, la force appliquée à la balle de sureau dépend et de la *tension* au point touché et de la charge de la balle de sureau : Poisson a appelé cette force *pression électrique*. La balle de sureau mise en contact avec le corps électrisé s'étant chargée d'une quantité d'électricité proportionnelle à l'épaisseur électrique au point touché, on voit que la pression électrique est proportionnelle au carré de l'épaisseur électrique. En général, on fait peu usage de cette notion de pression électrique : par contre, on définit souvent l'état électrique d'un corps en donnant les tensions aux divers points ; les nombres qui mesurent les épaisseurs ou les densités peuvent également être pris pour mesurer les tensions.

58. Distribution de l'électricité dans les corps conducteurs. — On peut, comme l'a fait Coulomb, déterminer expérimentalement la distribution de l'électricité à la surface des corps ; pour cela, on touche successivement divers points du corps avec le plan d'épreuve qui, placé dans la balance de torsion, donne, après chaque contact, la valeur (relative ou absolue) de la quantité d'électricité que possède ce plan d'épreuve et par suite fait connaître celle qui existait au point touché. Diverses précautions sont à prendre pour ces mesures, et notamment celle qui a pour effet de tenir compte de la déperdition continue, de la déperdition par l'air (54).

Coulomb a démontré expérimentalement que la distribution de l'électricité à la surface des corps est indépendante de la charge absolue, autrement dit que, si la quantité d'électricité qui existe sur ce corps vient à varier, les épaisseurs (ou les densités) aux différents points varieront, mais en conservant entre elles les mêmes rapports : que, par suite, le rapport des quantités totales d'électricité pour deux charges différentes sera le même que le rapport des épaisseurs (ou des densités) en un même point.

Poisson, comparant l'électricité à un fluide très mobile qui pourrait se mouvoir sans frottement dans les corps conducteurs, et ap-

pliquant à chaque particule les lois élémentaires de Coulomb (52, 53) a déterminé les conditions d'équilibre électrique. Nous dirons sans insister que, d'une manière générale, les résultats de ses recherches sont en concordance avec ceux que l'on a obtenus expérimentalement.

59. — Nous n'insisterons pas sur le détail des résultats et nous nous bornerons aux indications suivantes :

La tension (ou l'épaisseur, ou la densité) électrique est la même en tous les points d'une sphère isolée;

La tension électrique n'a pas la même valeur aux divers points d'un corps de forme quelconque ou d'une sphère qui est en contact avec d'autres corps;

D'une manière générale, la répartition s'effectue de telle sorte qu'il y a une plus grande tension vers les bords des plaques, sur les parties angulaires, à l'extrémité du grand axe d'un ellipsoïde;

Dans le cas d'un corps terminé en pointe, le calcul indique que la tension y doit être infinie : l'expérience a permis de vérifier qu'elle y est très grande.



Fig. 29.

Il résulte de là que si un corps électrisé et présentant une pointe est mis en présence d'un corps conducteur, les deux corps tendront à se mettre en équilibre électrique. Comme un corps est en réalité toujours placé dans l'air, on voit qu'il se mettra, dans tous les cas, en équilibre électrique avec l'air ambiant; c'est cette propriété qui constitue le pouvoir des pointes.

Dans le cas d'un corps ainsi terminé en pointe, on conçoit que les molécules d'air viennent s'électriser au contact et se trouvent soumises à une pression électrique (57) considérable, assez forte pour repousser ces molécules malgré la résistance au mouvement qu'offrent les molécules voisines. C'est ce mouvement de l'air repoussé par la pointe qui constitue ce que l'on nomme le *vent électrique;* par suite de la réaction, la pointe se trouve soumise à une force inverse qui est mise en évidence dans le *tourniquet électrique* (fig. 29).

Enfin Coulomb a étudié la manière dont se distribue une charge électrique entre deux sphères inégales que l'on a mises en contact, et principalement dans le cas où l'une des deux sphères est très petite par rapport à l'autre. Les résultats qu'il a obtenus expérimentalement concordent à peu près avec ceux que Poisson a trouvés par le

calcul : pour le dernier cas indiqué, on trouve que le rapport des densités électriques sur la petite et la grande sphère tend vers $\frac{\pi^2}{6} = 1,645$ lorsque le rayon de la petite sphère tend vers zéro.

60. Distribution de l'électricité dans les corps mauvais conducteurs. — Lorsqu'il s'agit de corps mauvais conducteurs, les phénomènes observés diffèrent notablement de ceux que nous venons de signaler : d'abord, comme nous l'avons déjà dit, l'électricité peut se manifester sur un point ou sur un espace limité sans s'étendre sur la surface à d'autres points. On peut, par exemple, toucher un gâteau de résine avec un corps électrisé : l'électrisation se manifestera et se conservera pendant un certain temps aux points touchés ; on s'en assurerait par exemple en projetant une poudre sur le gâteau de résine, elle se fixerait seulement sur les points électrisés.

Mais, de plus, l'électricité pénètre aussi à l'intérieur de ces corps : pour le prouver on peut mettre en communication avec la machine électrique un bloc d'acide stéarique qui se charge alors positivement ; on le décharge superficiellement, soit en le touchant avec les mains ou avec un conducteur, soit en fondant la surface ou en en dissolvant une petite couche dans l'alcool. Le corps ne présente plus alors aucune propriété électrique ; mais au bout de quelque temps il apparaît de nouveau électrisé positivement, la charge profonde venant ainsi se manifester superficiellement.

On peut encore électriser fortement un bâton de résine ou de cire d'Espagne en le mettant en contact avec la machine électrique qui lui communique une charge positive ; on le frotte alors avec une peau de chat et l'électrisation négative devient aussitôt manifeste ; mais si l'on abandonne le corps à lui-même, il arrive bientôt à l'état neutre, puis de nouveau positif ; ce qui se peut expliquer en imaginant que l'électricité a pénétré dans la masse d'où elle sort peu à peu en venant d'abord neutraliser l'état négatif, puis produire, à son tour, une électrisation positive.

61. Premières notions sur le potentiel. — Considérons deux sphères isolées de diamètres différents, dont l'une au moins soit électrisée, et placées à une assez grande distance pour qu'il n'y ait pas à tenir compte des actions d'influence. Réunissons-les par un fil fin ; après quelques instants, il se sera produit un état stable d'équilibre électrique. Si nous rompons alors la communication et si nous étudions ces sphères à l'aide du plan d'épreuve et de la balance de Coulomb, nous reconnaîtrons qu'elles contiennent des quantités différentes d'électricité. L'équilibre électrique n'est donc pas déterminé par l'égalité des quantités d'électricité.

On sait, d'autre part, que la densité ou la tension électrique varie aux différents points d'un corps qui n'est pas sphérique ; l'expérience prouve que deux corps électrisés réunis par un fil conducteur, comme nous venons de l'indiquer, ne subissent aucun changement électrique lorsque l'on change les points de contact du fil de manière à les produire en d'autres points où la tension soit différente ; ce n'est donc pas non plus l'égalité de tension qui détermine l'équilibre électrique.

Il nous faut introduire ici un nouvel élément, auquel on a été conduit par d'autres considérations, mais que nous pouvons caractériser expérimentalement en nous basant sur les faits relatés ci-dessus.

On dit que deux corps électrisés sont *au même potentiel* lorsque, placés assez loin de l'autre pour que les actions d'influence puissent être négligées et réunis par un fil conducteur fin, leur état électrique ne subit aucune modification. Dans le cas contraire on dit qu'ils sont *à des potentiels différents* et, par convention, celui qui cède de l'électricité est dit *à un potentiel plus élevé* que celui qui reçoit de l'électricité, quels que soient les signes caractérisant les états électriques de chacun de ces corps.

On peut comparer à ce point de vue un corps électrisé avec la terre; d'après ce que nous avons admis, les corps électrisés positivement sont à un potentiel plus élevé que la terre ; les corps électrisés négativement sont à un potentiel moins élevé que la terre. Comme cette comparaison est très facile, et sans se préoccuper de l'état *absolu* de la terre au point de vue électrique, on est convenu de considérer la terre comme étant toujours au potentiel zéro, de telle sorte que les corps électrisés + ont un potentiel positif et les corps électrisés — un potentiel négatif. Le signe qui caractérise ainsi l'état électrique d'un corps est donc le même que celui qui est joint à la valeur du potentiel.

62. — L'idée de potentiel n'est pas encore entrée dans l'enseignement élémentaire; nous croyons donc devoir donner quelques détails afin de faire comprendre le point de vue auquel on se place pour étudier l'électricité à l'aide de cette notion.

Imaginons deux réservoirs remplis d'un liquide et réunissons-les par un tuyau aboutissant de part et d'autre à la partie inférieure. Il pourra arriver, ou bien que l'équilibre existe immédiatement, ou bien, au contraire, qu'une certaine quantité de liquide passe de l'un des réservoirs à l'autre pendant un temps limité. Qu'est-ce qui détermine cet état relatif des deux réservoirs? ce n'est pas la *quantité*

de liquide qui existe dans chacun d'eux; ce n'est pas davantage la *pression* qui s'exerce sur le fond de chacun des vases, pression qui peut même varier d'un point à un autre si le fond n'est pas horizontal; un autre élément intervient, c'est le *niveau* du liquide. L'équilibre existe ou n'existe pas, suivant que les niveaux sont ou ne sont pas sur le même plan horizontal, c'est-à-dire suivant que ces niveaux sont ou ne sont pas à la même distance d'un plan horizontal donné, mais quelconque. Cette *hauteur du niveau* c'est l'analogue du potentiel électrique. On a pris l'habitude de donner conventionnellement les hauteurs au-dessus du niveau de la mer; c'est cette surface qui correspond au potentiel *zéro* attribué arbitrairement à l'état électrique de la terre.

On peut encore faire une autre comparaison intéressante : considérons un corps quelconque, hétérogène ou non, et étudions-le au point de vue de la chaleur; nous observerons que, en général, les *quantités* de chaleur n'y sont pas uniformément réparties, mais, si le corps est à l'état d'équilibre thermique, nous trouverons que la *température* est partout la même. Si, d'autre part, nous mettons deux corps en contact, ou en communication par l'intermédiaire d'un corps conducteur de la chaleur, l'équilibre pourra exister d'emblée, ou ne s'établir qu'après un certain temps. Dans ce cas encore ce n'est pas l'égalité des quantités de chaleur qui détermine l'équilibre, c'est l'égalité de température, c'est-à-dire le nombre plus ou moins considérable de degrés au-dessus de la température de la glace fondante, température arbitrairement choisie d'ailleurs. Ici encore l'analogie est grande avec ce que nous avons dit pour l'électricité et peut rendre plus facile la compréhension de certains faits ou de certaines lois que nous préciserons plus tard.

A cause de ces analogies par comparaison auxquelles il ne faut pas, du reste, attacher une importance exagérée, on appelle quelquefois le *potentiel* soit le *niveau électrique*, soit la *température électrique*.

63. Mesure du potentiel. — Électromètre Thomson. — Il ne suffit pas d'avoir la notion de deux corps qui sont au même potentiel ou qui sont à un potentiel différent, il faut arriver à une idée de mesure. On peut prendre comme mesure du potentiel l'indication fournie par une balance de torsion dont les deux boules, d'abord au contact, auraient été mises en communication par un fil fin et long avec le corps que l'on étudie : les boules se repousseront alors et la force de répulsion, après que l'on aura ramené toujours les boules à la même distance, sera la mesure relative du potentiel.

Il est préférable d'employer pour ces mesures l'électromètre de W. Thomson.

L'électromètre de W. Thomson se compose essentiellement de quatre secteurs métalliques placés horizontalement et isolés (fig. 30); A, A′, B, B′; ils sont deux à deux reliés par des fils métalliques, de manière que les deux secteurs opposés soient au même potentiel, V_1 pour A et A′, et V_2 pour B et B′; au-dessus et assez près se trouve une aiguille métallique C suspendue par un fil et que l'on maintient à un potentiel assez élevé V. Une analyse détaillée des actions qui se produisent a conduit aux résultats suivants :

L'aiguille est placée de telle sorte que son axe se trouve au-dessus d'une des séparations diamétrales des secteurs : on reconnaît immédiatement, par raison de symétrie, qu'elle est en équilibre si les potentiels V_1 et V_2 ont la même valeur; elle subit au contraire l'action d'un couple qui tend à la faire tourner lorsque les valeurs de V_1 et V_2 sont inégales.

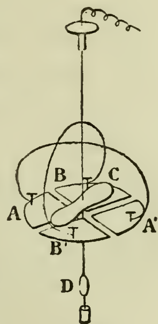


Fig. 30.

Pour ramener à sa position d'équilibre l'aiguille ainsi déviée, il faut développer en tordant le fil un certain couple qui contre-balance exactement le précédent : la valeur de ce couple sera pour nous la mesure relative de la différence de potentiel entre V_1 et V_2. L'expérience directe prouve d'ailleurs que les indications fournies par cet appareil sont proportionnelles à celles données par la balance de Coulomb.

Les conditions précédentes sont incommodes au point de vue pratique : on préfère laisser l'aiguille se dévier de sa position d'équilibre et mesurer la déviation; seulement il faut que cette déviation soit petite pour qu'elle soit proportionnelle à $(V_1 — V_2)$, car les forces en jeu changent avec la position même de l'aiguille. D'une part, on rend le changement moindre en donnant à l'aiguille une forme spéciale, déterminée par le calcul, et d'autre part, on diminue la déviation en employant une suspension bifilaire. Comme les déviations, très petites, sont alors difficiles à apprécier, le système mobile porte un petit miroir D dans lequel on voit avec une lunette l'image d'une règle graduée : les angles dont tourne le miroir peuvent alors être évalués avec une grande précision.

L'aiguille est maintenue à un potentiel déterminé par l'action d'une petite jarre électrique que l'on charge à l'avance; on réunit entre eux les quatre secteurs, on amène l'aiguille dans la position médiane et l'on fait une visée à la lunette. On met alors respecti-

vement les secteurs A et B en communication avec les corps de potentiel V_1 et V_2 ; A et A′ prennent le potentiel V_1, B et B′ le potentiel V_2 et aussitôt l'aiguille est déviée ; lorsqu'elle s'est arrêtée on fait une nouvelle visée; l'angle de déviation, déduit de ces deux visées, est proportionnel à $V_1 - V_2$; en particulier, si l'un des couples de secteurs, B, B′ par exemple, communique à la terre, la déviation est proportionnelle à V_1.

Nous reviendrons plus tard sur cet appareil.

64. Propriétés générales du potentiel. — Nous allons indiquer dans quelques cas simples comment varie le potentiel.

On peut d'abord prouver que pour un même corps le potentiel varie proportionnellement à la quantité d'électricité ; pour cela on électrise une sphère dont on évalue le potentiel ; puis on la met simultanément en contact avec 1, 2... sphères identiques, de telle sorte qu'après séparation elle ne conserve que $^1/_2$, $^1/_3$... de la quantité d'électricité qu'elle possédait primitivement. On reconnaît que le potentiel a des valeurs qui sont la moitié, le tiers... de sa valeur primitive.

On peut également rechercher quelle est, à égalité de charge, l'influence du rayon de la sphère. L'expérience ne permet pas de faire la mesure directement, parce que l'on ne possède pas un moyen de charger une sphère quelconque d'une quantité déterminée ; mais, par une méthode indirecte, que nous indiquons d'autre part[1], on parvient à démontrer la loi suivante :

1. Proposons-nous de chercher l'influence du rayon de la sphère à égalité de charge. Prenons pour cela deux sphères de rayons R_1 et R_2 et soit e la quantité d'électricité dont la 1re est chargée au commencement de l'expérience ; soit V le potentiel correspondant. Mettons les deux sphères en contact et soient e_1 et e_2 les quantités dont les sphères resteront chargées après le contact ; soient alors V'_1 et V'_2 les potentiels évalués séparément. On a évidemment, d'après la remarque précédente :

$$\frac{V'_1}{V_1} = \frac{e_1}{e}.$$

Appelons V_2 le potentiel de la 2e sphère ; si elle contenait la quantité d'électricité e, on aurait :

$$\frac{V'_2}{V_2} = \frac{e_2}{e},$$

et comme on a $e = e_1 + e_2$, il vient $e_2 = e - e_1$, et par suite :

$$\frac{V'_2}{V_2} = 1 - \frac{e_1}{e} = 1 - \frac{V'_1}{V_1},$$

équation de laquelle on déduit :

$$\frac{V_1}{V_2} \quad \frac{V_1 - V}{V'_2}.$$

A égalité de charge, les potentiels de deux sphères sont en raison inverse des rayons des sphères.

Si donc, maintenant, on a deux sphères de rayon R, R′ chargées des quantités d'électricité e, e', les potentiels étant V et V′, on a :

$$\frac{V}{V'} = \frac{e}{e'} \times \frac{R'}{R},$$

d'où :

$$\frac{VR}{e} = \frac{V'R'}{e'}$$

et si nous appelons k la valeur constante de ce rapport qui dépend des unités choisies, on a immédiatement :

$$V = k\frac{e}{R}.$$

Pour nous conformer aux habitudes, nous dirons qu'on peut toujours choisir pour mesurer V une unité qui rende la valeur de k égale à l'unité, de telle sorte que le potentiel d'une sphère est :

$$V = \frac{e}{R}.$$

Si par la pensée nous imaginons la surface de la sphère partagée en petits éléments dont chacun renferme une quantité d'électricité connue, on a évidemment $e = \Sigma\varepsilon$ (le signe Σ exprimant qu'on fait la somme de toutes les valeurs que prend le terme écrit à la suite), et il vient aussi :

$$V = \frac{\Sigma\varepsilon}{R} = \Sigma\frac{\varepsilon}{R}.$$

65. — Imaginons que nous considérions un point quelconque situé à l'intérieur d'une sphère que nous prenions sa distance ρ à un point quelconque de la surface chargée d'une quantité ε d'électricité et qu'opérant de même pour tous les points de cette surface nous fassions la somme des termes de la forme $\frac{\varepsilon}{\rho}$; on peut démontrer que l'on a :

$$\Sigma\frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{e}{R} = V$$

Les valeurs de V_1, V'_1 et V'_2, déterminées par l'expérience, satisfont à l'équation :

$$\frac{V_1 - V'_1}{V'_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Donc, pour une même charge, les potentiels V_1 et V_2 de deux sphères sont en raison inverse des rayons des sphères.

Cette quantité $\Sigma \frac{\varepsilon}{\rho}$, constante pour tous les points de l'intérieur de la sphère, quantité qui ne correspond plus à une donnée physique expérimentalement appréciable et qui est seulement égale à la valeur numérique de V définie expérimentalement, au contraire, est ce que l'on appelle le *potentiel de la sphère*.

Si nous considérons un corps conducteur de forme quelconque, on parvient à démontrer également que le potentiel $\Sigma \frac{\varepsilon}{\rho}$ pris pour un point quelconque de l'intérieur du corps est constant.

Si, dans l'un et l'autre cas, on prend le potentiel pour un point de la surface, on trouve qu'il a une valeur constante. Mais si on considère un point extérieur, la valeur de $\Sigma \frac{\varepsilon}{\rho}$ dépend de la position du point par rapport au corps électrisé et doit être appelée, en précisant, le potentiel du corps sur le point P. L'ensemble des points de l'espace où le potentiel a la même valeur est ce qu'on appelle une *surface équipotentielle :* ces surfaces sont analogues aux surfaces de niveau dans les liquides pesants.

S'il s'agit d'une sphère, on peut démontrer que la valeur du potentiel est la même que si toute la masse d'électricité était condensée en son centre.

On peut démontrer que le potentiel ainsi défini a un rapport intime avec la force exercée par le corps électrisé sur le point considéré ; on arrive en effet à prouver :

1° Que cette force est, au point considéré, normale à la surface équipotentielle ;

2° Que les dérivées de la fonction potentielle donnent précisément la valeur des composantes de cette force, qui se trouve dès lors complètement déterminée.

On conçoit, eu égard à ces importantes propriétés, que le potentiel doit jouer un rôle capital dans toutes les questions d'équilibre électrique.

Nous n'insisterons pas sur les conséquences que l'on en pourrait déduire et nous nous bornerons à signaler le théorème suivant qui a été pris par quelques auteurs comme définition du potentiel :

Le potentiel d'un corps mesure le travail mécanique correspondant au déplacement de l'unité d'électricité depuis l'infini jusqu'à la surface du corps [1].

66. Influence électrique. — Nous devons maintenant revenir

1. Soit R le rayon d'une sphère, *e* la quantité d'électricité qu'elle contient et

avec quelques détails sur l'influence électrique ; comme nous l'avons déjà indiqué, il ne s'agit pas là d'un phénomène spécial, mais d'un cas particulier d'équilibre électrique, de distribution électrique.

Considérons un corps conducteur isolé BC (fig. 31) et soit A un point matériel électrisé, positivement par exemple, que l'on approche à une certaine distance. La présence de ce point troublera l'équilibre qui existait, et si l'on considère une molécule m d'électricité dans le conducteur BC, on voit qu'elle sera soumise à une force répulsive qui, au début de l'action, existant seule repoussera m vers la partie C ; de telle sorte que cette partie C sera électrisée positivement, c'est-à-dire semblablement à A ; tandis qu'en B d'où l'électricité sera repoussée il y aura déficit, et par suite charge négative, opposée à celle qui existe sur A. Mais l'existence de ces charges fait naître de nouvelles forces appliquées à chaque molécule m, forces répulsives

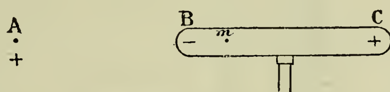


Fig. 31.

émanées de C, attractives émanées de B, les unes et les autres opposées à l'action exercée par A ; de telle sorte qu'à un certain moment il y aura égalité entre les forces agissant dans un sens et celles qui agissent dans l'autre ; à cet instant, un nouvel équilibre électrique sera établi. Si la charge de A disparaît, les forces émanées de B et de C sont seules à agir et, détruisant l'effet exercé par A, ramènent le corps à l'équilibre primitif.

Si le corps BC (fig. 32) est en communication avec le sol, l'effet exercé par A sera le même et les molécules électriques telles que m seront repoussées dans le réservoir commun, ce qui établira B dans un

qui, au point de vue des attractions et répulsions sur les corps extérieurs, agit comme si elle était condensée au centre, et soit x la distance de ce centre au point où est le corps chargé de l'unité d'électricité : la force qui agit est $\frac{e}{x^2}$ et le travail élémentaire $\frac{e\,dx}{x^2}$. Le travail total T sera donné par l'intégrale

$$\int_{\infty}^{R} \frac{e\,dx}{x^2} = -\frac{e}{R}$$

le travail qu'il aurait fallu communiquer est $\frac{e}{R}$, ce qui est bien la valeur du potentiel V.

état électrique contraire à A. Mais alors l'action exercée par B, opposée à celle de A, et croissant en même temps qu'augmente la charge de B, parviendra à faire équilibre à celle de A. Dans ce

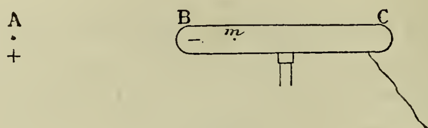


Fig. 32.

cas, la charge de B devra être plus forte que celle qui existait dans le premier cas : car dans ce premier cas, l'action de C venait s'ajouter à celle de B pour contre-balancer A ; ici, la charge + repoussée dans le réservoir commun est sans action sur les molécules *m* et dès lors, pour l'équilibre, la charge de B devra être augmentée.

67. — La question est moins simple si l'on a en A, non pas un point influent, mais un corps de forme et de dimension quelconques : lorsque par suite de l'influence il y aura deux charges contraires en B et C, ces charges agiront sur l'électricité de A, et amèneront une nouvelle distribution, ce qui produira un changement correspondant dans BC ; il y aura donc influence réciproque. On comprend facilement que le résultat sera d'augmenter la grandeur de la charge sur la partie de A voisine du corps BC, en même temps que dans ce corps l'effet général d'influence se produira.

Si l'on place un second conducteur isolé B′C′ à la suite du premier, il subira également un effet d'influence analogue à celui signalé pour BC : il y aura en B′ une charge opposée à celle de A, et en C′ une charge semblable. Il faut comprendre que cette influence ne dépend pas seulement de la charge accumulée en C, bien que l'action de celle-ci soit prépondérante, mais qu'il faut tenir compte des actions multiples exercées sur une molécule quelconque, à savoir les forces répulsives émanées de A et de C, qui agissent dans un sens, et les forces attractives émanées de B et B′, et la force répulsive émanée de C′, qui agissent dans un sens opposé.

Naturellement aussi il y a réaction sur les corps influents, et la distribution de A et de BC change par suite de la présence du conducteur B′C′.

68. Influence électrique au point de vue de la quantité. — Faraday a démontré que la quantité d'électricité influencée est égale à la quantité influençante, à la condition de tenir compte de tous les corps qui sont réellement influencés. On peut démontrer qu'il en est ainsi par l'expérience suivante.

Un cylindre métallique creux AB (fig. 33), monté sur un support isolant, communique par un conducteur métallique avec une tige conductrice portant deux minces feuilles d'or C,D placées sous une cloche de verre (électroscope). On électrise une sphère M, positivement par exemple, et, la tenant par un fil isolant, on l'introduit dans le cylindre : immédiatement les feuilles d'or divergent et de plus en plus, au fur et à mesure que la boule est enfoncée davantage. On touche alors l'électroscope avec le doigt : les feuilles d'or retombent ; le système est cependant électrisé, car si on enlève la boule, les feuilles d'or s'écartent de nouveau. Mais si, au contraire, on met en contact la boule électrisée positivement et le cylindre, négatif par influence, les feuilles d'or électrisées restent dans la verticale, ce qui prouve que l'équilibre électrique s'est produit et qu'il y avait égalité entre les quantités d'électricité en jeu dans cette expérience.

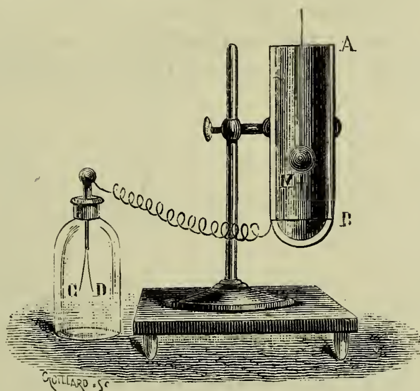


Fig. 33.

Faraday a répété cette expérience en prenant quatre cylindres creux emboités l'un dans l'autre et reposant sur des matières isolantes. En introduisant une sphère électrisée dans le cylindre intérieur, les feuilles de l'électroscope divergent, et si la charge de la sphère est la même que dans le cas précédent, la divergence des feuilles d'or sera aussi la même : l'influence s'est fait sentir à travers les autres cylindres, écrans métalliques isolés. On touche l'électroscope avec le doigt, les feuilles retombent, bien que le cylindre extérieur reste électrisé. Si l'on vient à toucher ce cylindre avec la sphère, les feuilles d'or restent verticales : la quantité d'électricité influencée sur le cylindre extérieur était donc égale à la quantité d'électricité influençante.

Il résulte de là que, dans les cas ordinaires (fig. 32), la charge

électrique du corps influencé est moindre que celle du corps influençant, car il faut pour retrouver une charge égale à celle-ci tenir compte de l'influence produite sur *tous* les corps voisins.

69. Les écrans électriques. — Examinons ce qui se passe lorsque l'on interpose, entre un corps électrisé A (fig. 34) et un corps C, qui est influencé par A, un conducteur métallique B de peu d'épaisseur. L'expérience prouve que si celui-ci est isolé, cette interposition ne produit aucun effet appréciable; mais que si, au contraire, cette lame conductrice (qui peut n'être pas continue, mais être constituée par une toile métallique) est en communication avec le sol, tout effet d'influence cesse de se manifester sur le corps C.

Il est facile d'expliquer ces effets : dans le premier cas (fig. 34), les deux faces du conducteur sont électrisées par influence et contrairement, les quantités d'électricité étant égales. En réalité, le corps C sera soumis à trois actions : celle de A (car il n'y a pas de raison de supposer à priori que les actions électriques ne puissent agir à travers les métaux), puis celles des deux faces de B. Ces deux dernières

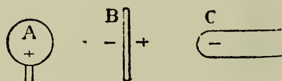


Fig. 34.



Fig. 35.

sont de sens contraires et de plus elles sont sensiblement égales, car elles correspondent à des quantités égales agissant à des distances très peu différentes : ces deux actions se détruisent donc à peu près et tout se passe comme s'il n'y avait que le corps A, agissant seul.

Il n'en est plus de même si le conducteur B (fig. 35) est en communication avec le sol : alors il sera chargé, contrairement à A, d'une quantité d'électricité moindre que celle de A (68). Le corps C sera alors soumis à deux actions seulement, actions contraires évidemment; de plus, celle qui est produite par A correspond à une plus grande quantité, mais à une plus grande distance, que celle qui est produite par B, et l'on comprend qu'il puisse y avoir compensation, comme l'expérience prouve que cela est effectivement.

Ce fait explique pourquoi il convient de placer sous une cloche en toile métallique et communiquant avec le sol les appareils délicats, électroscope, etc., qui se trouvent dans le voisinage d'appareils fortement électrisés qui pourraient, même à grande distance, agir sur l'électroscope.

70. **Influence dans le cas de corps électrisés.** — Un corps électrisé isolé présente à sa surface une certaine distribution de l'électricité qui répond à un équilibre en vertu duquel, en chaque point, comme nous l'avons dit, la résultante des actions électriques émanées des autres points est nulle ou normale à la surface. La présence d'un corps électrisé voisin devra, comme dans le cas où le corps influencé est neutre, modifier la grandeur et la direction des forces, de telle sorte que l'état électrique précédent ne peut pas subsister et doit être remplacé par un autre qui se modifiera de nouveau si les forces élémentaires varient, ce qui arrivera lorsque l'on approchera le corps influençant.

Il est facile dans tous les cas de se rendre compte de ce qui doit arriver, en remarquant que l'on peut imaginer que la distribution définitive soit telle que, en chaque point, la quantité d'électricité

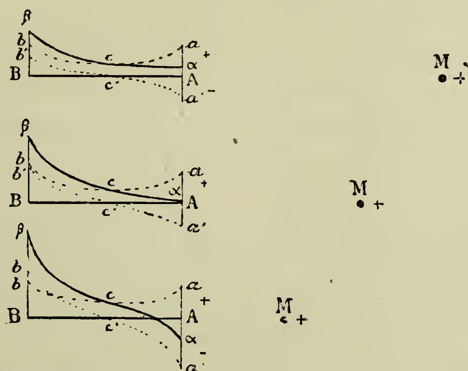


Fig. 36.

soit la somme algébrique de la quantité d'électricité qui existait primitivement et de celle qui se manifesterait en ce point si le corps non électrisé était soumis à l'influence du corps électrisé voisin.

Soit par exemple un corps, auquel nous supposerons la forme la plus simple d'une ligne droite AB (fig. 36), électrisé positivement et dont la distribution serait représentée par la ligne ponctuée *acb*. Sous l'influence du corps M, électrisé aussi positivement, ce corps subirait une influence qui amènerait une distribution représentée par la ligne ponctuée $a'c'b'$ s'il avait été primitivement à l'état neutre. L'influence effective sera représentée par la ligne pleine $\alpha\beta$, telle que chacune de ses ordonnées soit la somme algébrique des ordonnées des deux courbes précédentes. Dans le premier cas de la figure 36, l'effet produit sera d'abord seulement une modification dans la distribution

de l'électrisation qui restera positive partout. Mais si le corps influençant se rapproche, la courbe $a'c'b'$ aura ses ordonnées de plus en plus grandes en valeur numérique. Pour une distance convenable, on arrivera à ne trouver en A aucune trace d'électrisation, tandis qu'en B celle-ci, toujours positive, aura augmenté. Enfin si le corps influençant se rapproche encore, le corps se trouvera électrisé négativement en A, tandis que, en B, il sera électrisé positivement mais d'une manière plus intense.

Il va sans dire que les effets produits seraient exactement inverses si le corps influençant était électrisé contrairement au corps influencé. C'est ce qu'indique la figure 37, sans qu'il soit nécessaire de répéter les explications précédentes.

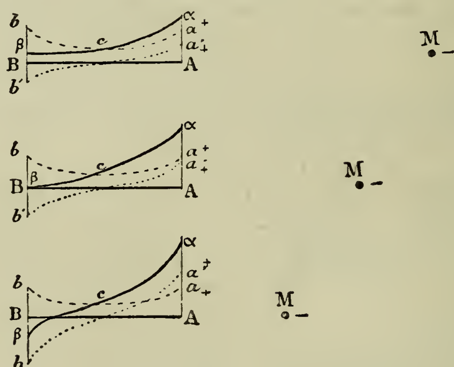


Fig. 37.

71. Influence dans les attractions et répulsions électriques. — Lorsque nous avons signalé les attractions et les répulsions qui se manifestent entre les corps électrisés, nous avons admis que ces corps étaient réduits à des dimensions négligeables, de telle sorte que l'on ne pouvait y observer des modifications de distribution électrique comme il s'en manifeste par suite de l'influence. Il faut maintenant tenir compte des effets de ce genre qui peuvent se produire dans le cas de corps de dimensions finies, et cela nous expliquera le fait primordial de l'attraction des corps légers par les corps électrisés.

Soient C un corps électrisé, positivement par exemple, et AB un corps à l'état neutre que nous supposerons suspendu par un fil conducteur : AB subira l'influence de C et, par suite (44), s'électrisera négativement. Il y aura donc attraction comme cela arrive entre les corps électrisés contrairement.

Si, au contraire, le corps AB (fig. 38) est supporté par un fil isolant, l'influence aura pour effet de modifier la répartition de l'électricité ; dans ce cas, la partie B la plus rapprochée de C perdra de l'électricité, sera électrisée négativement, tandis que la partie A la plus éloignée en gagnera, sera électrisée positivement. Les quantités d'électricité mises en jeu seront les mêmes de part et d'autre ; seu-

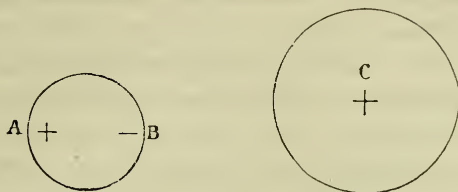


Fig. 38.

lement, les distances étant différentes, l'action attractive correspondant à une distance moindre sera plus considérable que l'action répulsive : la résultante observée sera donc attractive. Il importe de remarquer que l'attraction sera moins forte dans ce cas que dans le cas précédent, puisqu'elle sera contre-balancée par une force répulsive qui n'existait pas lorsque le corps AB était porté par un corps conducteur.

72. — Les résultats pourront être différents si le corps isolé AB est primitivement électrisé. Supposons d'abord qu'il soit électrisé contrairement à C : d'après ce que nous avons dit (70), l'influence aura pour effet de changer la distribution électrique, mais à toutes les distances le résultat de cette influence sera que la partie voisine B sera plus électrisée que la partie opposée ; il y aura donc attraction dans tous les cas, parce que la quantité d'électricité qui agit en B est plus grande que celle qui agit en A et parce que cette dernière est à une plus grande distance.

Supposons maintenant que AB soit électrisé de la même manière que C : alors il y aura toujours plus d'électricité sur la partie la plus éloignée A que sur la partie la plus rapprochée B, soit que celle-ci soit simplement amenée à l'état neutre, soit qu'elle contienne moins d'électricité que celle qui correspondrait à cet état neutre ; les quantités d'électricité qui agissent sont inégales et placées à des distances inégales aussi et de telle façon que la plus considérable est la plus éloignée. On comprend donc que, dans de certaines conditions, il y ait égalité d'action, par conséquent équilibre ; c'est-à-dire que pour une certaine distance entre AB et C il n'y aura ni attraction ni répulsion ; si la distance est plus grande, l'action

répulsive l'emporte, tandis que, au contraire, il se produit une attraction si la distance est moindre.

Il résulte de là que si l'on veut étudier l'action d'un corps électrisé sur un corps électrisé, il importe d'opérer en agissant d'abord à grande distance et rapprochant peu à peu : si l'on approchait trop près, en effet, le dernier cas que nous venons d'indiquer pourrait donner lieu à une méprise, en montrant une attraction tandis que l'on aurait dû voir une répulsion. Cette précaution doit être prise soigneusement même dans les expériences faites à l'aide du pendule électrique, car, malgré ses faibles dimensions, la balle de sureau n'est pas un *point* matériel.

73. Étincelle électrique. — Lorsque l'on approche l'un de l'autre deux corps électrisés contrairement, la distribution se modifie continûment à mesure que la distance diminue, de telle sorte qu'il y a pour ainsi dire concentration de l'électrisation dans les points les plus voisins; de plus, à cause de la diminution de la distance, les forces attractives augmentent et, par suite aussi, ce que nous avons appelé la tension électrique. Il arrive un moment où celle-ci est assez forte pour vaincre la résistance opposée par la couche d'air interposée ou par toute autre substance isolante : l'électricité se porte alors brusquement d'un corps sur l'autre de manière à rétablir l'équilibre, en donnant naissance à ce que l'on appelle l'*étincelle électrique*, dont nous étudierons plus loin les effets.

L'étincelle se produit encore entre un corps électrisé et un corps à l'état neutre; le phénomène est encore le même, en réalité, et il y a toujours en présence deux parties électrisées contrairement, puisque la simple approche du corps électrisé aura, par influence, causé une électrisation contraire dans le corps non électrisé.

Si les deux corps mis en présence sont chargés contrairement de la même quantité d'électricité, après l'étincelle, ils sont l'un et l'autre ramenés à l'état neutre; s'il s'agit d'un corps neutre isolé et d'un corps électrisé, après l'étincelle on trouve le corps électrisé rapproché de l'état neutre et le corps qui était neutre chargé semblablement au corps électrisé : non pas que l'électricité de celui-ci se soit transportée sur l'autre, mais parce que la neutralisation réciproque des parties voisines a laissé isolée sur le conducteur l'électrisation semblable à celle du corps influençant, laquelle se répartit alors dans tout le corps.

Il va sans dire que si le corps neutre est en communication avec la terre, après l'étincelle on ne trouve plus d'électricité ni sur l'un ni sur l'autre corps.

Les résultats sont complexes si les deux corps sont chargés l'un et l'autre, mais non pas également, et contrairement.

74. — D'une manière générale on peut dire que, pour une charge donnée, la distance à laquelle peut éclater l'étincelle augmente quand la pression de l'air décroît, au moins jusqu'à une certaine valeur, à partir de laquelle cette distance diminue. L'expérience semble montrer que dans le vide le plus absolu que nous puissions obtenir l'étincelle ne se produit pas : mais la question est complexe et peut être interprétée diversement (Edlund).

Les effets que l'on observe dans les circonstances ordinaires ne paraissent pas toujours conformes aux résultats généraux que nous venons d'indiquer; mais cela tient à ce que l'atmosphère contient toujours une certaine quantité d'humidité; la vapeur d'eau étant un bon conducteur, on comprend que les conditions de la décharge se trouvent complètement changées et que l'étincelle puisse se produire à une plus grande distance.

La décharge ne donne pas toujours lieu aux mêmes effets : Faraday les a classés en *étincelles*, *aigrettes*, *lueurs*, *décharges obscures*. Nous reviendrons ultérieurement sur ces divers phénomènes.

75. Influence dans le cas de corps terminés en pointe. — L'influence se manifeste dans les corps terminés en pointe comme dans tous les autres conducteurs, seulement les effets sont différents à cause de la propriété que possèdent les pointes de rétablir l'équilibre électrique.

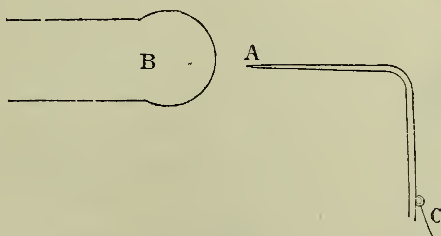


Fig. 39.

Supposons qu'une pointe conductrice A (fig. 39), mise en communication avec le sol, soit placée en face d'un corps électrisé B; au bout de quelques instants, ce corps sera déchargé sans qu'il y ait eu étincelle à proprement parler. L'influence aura produit sur la pointe une électrisation contraire à celle du corps, mais, par suite de l'augmentation de tension, l'équilibre se sera produit peu à peu, sans que jamais la quantité d'électricité existant à un même instant sur cette

pointe ait pu donner lieu à une étincelle. Mais le passage de l'électricité est manifeste et, dans l'obscurité, la pointe est surmontée d'une aigrette, d'une lueur.

L'effet peut se continuer si au lieu d'opérer sur un corps électrisé on place la pointe en face d'une machine électrique; on reconnaîtra d'ailleurs que pendant que la pointe sera dirigée vers la machine, celle-ci ne pourra pas se charger.

Si en face d'un corps électrisé, on place un conducteur isolé et muni d'une pointe, on verra que, comme précédemment, le corps électrisé sera ramené à l'état neutre et qu'il n'y aura sur le corps influencé que des marques d'une électrisation contraire à celle du corps : le fait s'explique trop simplement pour qu'il soit nécessaire d'insister. Il importe seulement de remarquer que cette électrisation ne pourra pas subsister, car lorsque le corps influençant aura été déchargé, il se produira une nouvelle distribution électrique dans le corps influencé et l'équilibre électrique se produira rapidement, l'effet de la pointe se manifestant de nouveau. Pour qu'il n'en soit pas ainsi, il faut ou que l'on enlève la pointe après que le premier effet aura été produit, ou que l'on recharge constamment le corps influençant à mesure qu'il est déchargé par l'action de la pointe.

76. Électroscope a feuilles d'or. — Le pendule électrique est insuffisant lorsqu'il faut étudier des actions électriques de peu d'intensité; on a alors recours aux électroscopes et spécialement à l'électroscope à feuilles d'or. Il consiste essentiellement (fig. 40) en une tige métallique terminée à sa partie supérieure par une boule A, et supportant à son extrémité inférieure B deux minces feuilles d'or *c* et *d* de quelques millimètres de largeur. La tige traverse la tubulure d'une cloche en verre, à l'intérieur de laquelle se trouvent ainsi suspendues les feuilles d'or : toutes les précautions sont prises pour que la cloche soit sèche ainsi que l'air qu'elle contient, afin qu'il n'y ait pas de perte d'électricité, ou le moins possible.

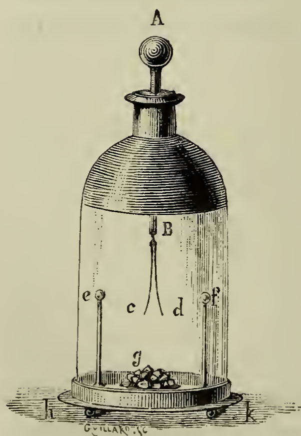


Fig. 40.

Il est facile de concevoir comment l'électroscope permet de reconnaître si un corps est électrisé et quelle est la nature de son électrisation.

A l'état neutre, les feuilles d'or, sous l'action de la pesanteur, tombent verticalement et restent en contact : si l'on approche un corps électrisé, il y a électrisation par influence, la boule s'électrise contrairement au corps, les feuilles semblablement; mais étant de même nom l'une par rapport à l'autre, elles se repoussent et divergent. L'action disparaît, comme résultant de l'influence électrique, si l'on éloigne le corps électrisé. Comme il est évident que l'approche d'un corps non électrisé ne pourrait produire aucun effet sur les feuilles d'or, il y a là un moyen de savoir si un corps est ou n'est pas électrisé.

On peut charger un électroscope ; pour cela on en approche un corps électrisé, on touche l'électroscope avec le doigt, l'électrisation des feuilles d'or disparaît (44); on enlève le doigt, puis l'on éloigne le corps électrisé : il se produit alors un changement dans la distribution électrique et les feuilles divergent de nouveau, mais étant alors dans un état contraire à celui du corps électrisé.

77. — Quelle est enfin l'action d'un corps électrisé sur un électroscope précédemment chargé? Distinguons deux cas (70) :

1° Le corps est électrisé semblablement à l'électroscope. Ce corps agira par influence, tendra à produire sur la boule une électrisation contraire à celle qui y est, c'est-à-dire de même nom que celle qu'il possède, et à mettre les feuilles d'or dans le même état que lui, c'est-à-dire qu'il augmentera l'effet qui existe sur ces feuilles ; celles-ci s'écarteront donc de plus en plus à mesure qu'on approchera le corps électrisé du bouton de l'électroscope.

2° Le corps électrisé et l'électroscope électrisé sont de signes contraires. L'action du corps sera de produire dans l'électroscope un effet d'influence qui donnera au bouton un signe contraire à celui du corps, c'est-à-dire le même signe que celui qu'il a, et qui donnera aux feuilles le même signe qu'au corps, c'est-à-dire un signe contraire à celui qu'elles ont. Si le corps influençant est éloigné, son action sera peu énergique, elle affaiblira l'effet produit sans l'annuler, c'est-à-dire que les feuilles d'or se rapprocheront seulement un peu. L'influence augmentera à mesure que le corps influençant se rapprochera et, pour une position convenable, son action contre-balancera exactement l'action antérieure, les feuilles d'or retomberont au contact; puis, par suite d'un plus grand rapprochement, l'effet d'influence croissant toujours l'emportera et les feuilles prendront le même signe que le corps, mais comme elles sont de même signe l'une par rapport à l'autre, elles divergeront et d'autant plus fortement que le corps influençant sera plus proche. Il va sans dire

que si l'on éloigne ce corps, les mêmes effets se produiront en ordre inverse.

On comprend aisément qu'il faut opérer avec lenteur dans les deux cas, car sans cela les feuilles d'or pourraient en s'écartant violemment se déchirer et s'aller coller contre les parois de la cloche. (On obvie à cet inconvénient en disposant, dans la direction de l'écart des feuilles, des pièces métalliques *e*, *f* en communication avec le sol et qui déchargent les feuilles dès qu'il y a contact.) Cette précaution est plus nécessaire encore dans le second cas que nous avons indiqué, car si l'on opérait trop vite on pourrait ne pas apercevoir le rapprochement initial et, ne voyant que l'écartement final qui peut être considérable, penser que l'on se trouve dans le premier cas.

78. — Ceci posé, l'emploi de l'électroscope est facile à concevoir; étant donné un corps A, on l'approche d'un électroscope à l'état neutre; s'il n'y a pas d'effet, le corps est aussi à l'état neutre ; il est électrisé si les feuilles divergent. On charge alors l'électroscope avec le corps A, comme nous l'avons dit ci-dessus, et l'on sait qu'il est alors de signe contraire à A. Puis, éloignant A, on approche lentement de l'électroscope un corps électrisé, comme un bâton de résine par exemple, qui est électrisé négativement, et l'on peut reconnaître d'après ce que nous venons de dire si l'électroscope est de même signe ou de signe contraire à la résine; l'on saura alors que le corps A est de signe contraire à la résine (positif) ou de même signe (négatif).

79. Machines électriques. — Électrophore. — Les machines électriques dont on s'est servi jusque dans ces dernières années sont basées sur les principes simples que nous avons indiqués ci-dessus : nous décrirons seulement les plus employées.

L'*électrophore* (fig. 41), imaginé par Volta, consiste en un gâteau de résine fondu dans un moule et que l'on électrise négativement en le frottant ou le frappant avec une peau de chat. On place alors sur ce gâteau un plateau conducteur en métal (ou plus généralement en bois recouvert d'une feuille métallique) et porté par un manche isolant. Il se produit une action d'influence, le plateau s'électrise négativement à la face supérieure et positivement à la face inférieure : comme cette face ne touche en réalité la résine que par un petit nombre de points, que la résine et la couche d'air interposée sont d'ailleurs des corps mauvais conducteurs, il n'y a pas neutralisation à la face inférieure. On touche alors avec le doigt le plateau métallique : l'électrisation négative disparaît; mais nécessairement, il ne se manifeste pas d'action positive. Si l'on vient alors à soulever le pla-

teau (fig. 42), l'électrisation positive, n'étant plus contre-balancée par la résine électrisée, peut se manifester et donner naissance, quoique faiblement, à la plupart des phénomènes électriques. Une fois le plateau déchargé, on peut le charger à nouveau de la même façon, car il faut remarquer que la résine, agissant seulement par influence,



Fig. 41.

est restée électrisée comme précédemment. Si le gâteau de résine est maintenu dans un air sec, il peut conserver son électrisation pendant plusieurs jours et même plusieurs semaines, ce qui en fait un appareil commode.

L'étincelle produite par un électrophore, quoique peu considérable, est suffisante pour enflammer des mélanges gazeux dans l'eudiomètre.

On a donné à l'électrophore une autre disposition évitant les inconvénients de la résine qui, à la longue, se fendille, puis se brise : on fait usage d'une plaque d'ébonite (caoutchouc durci) sur laquelle on pose un disque de métal que l'on soulève à l'aide de trois fils de soie. Il va sans dire que la théorie est la même que celle donnée ci-dessus.

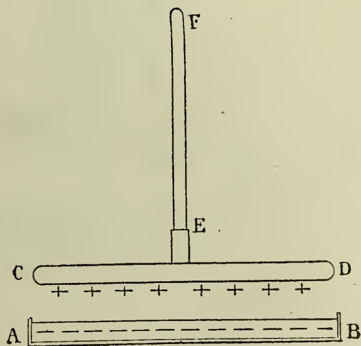


Fig. 42.

80. Machine de Ramsden. — La machine de Ramsden, qui est généralement employée en France, est un appareil dérivant directement, sauf des modifications de forme, de la machine employée primitivement par Otto de Guéricke.

Cette machine consiste en un disque de verre tournant autour

d'un axe horizontal et passant entre leux paires de coussins portés par des montants verticaux A,B (fig. 43). Ces coussins, dont il est bon d'enduire la surface d'or mussif ou d'un amalgame de bismuth et d'étain, sont en communication avec le sol par une lame métallique qui règne dans toute la hauteur des montants. Par la rotation et le frottement qui s'ensuit, le verre s'électrise positivement, tandis que les coussins sont maintenus à l'état neutre par la communication avec le sol.

D'autre part, aux extrémités du diamètre horizontal se trouvent

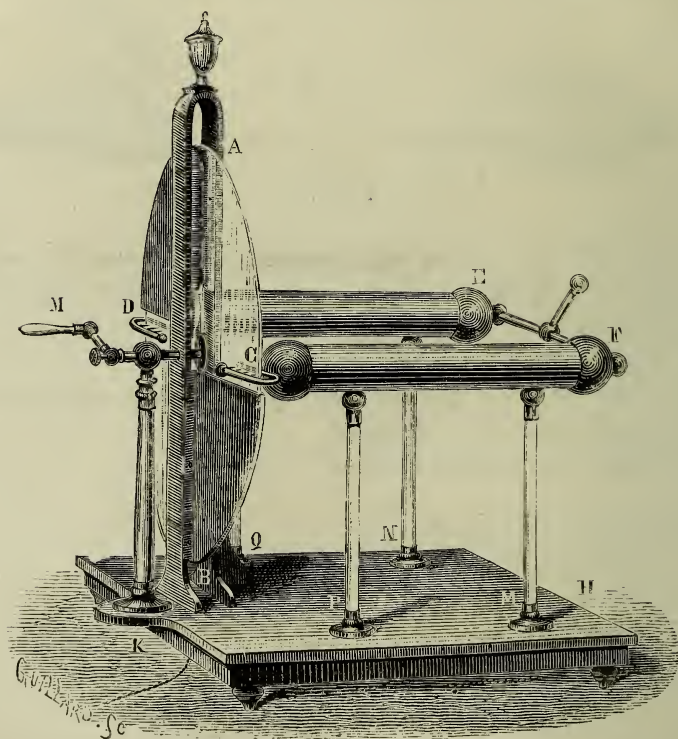


Fig. 43.

des peignes C, D, pièces métalliques en forme d'U armées à l'intérieur de pointes entre lesquelles passe le disque de verre. Ces peignes sont portés par un ou deux conducteurs métalliques E, F, isolés par des pieds en verre M,N,P,Q. On comprend que lorsqu'une partie du disque, électrisée positivement, arrivera en face des pointes, on observera les effets que nous avons signalés (74) : le verre sera ramené à l'équilibre électrique, déchargé par l'action des pointes, et le

conducteur à l'extrémité opposée se trouvera électrisé positivement; c'est à cette extrémité que l'on observera les effets que la machine est susceptible de donner.

On voit que, après le passage entre les peignes, le verre est ramené à l'état neutre et que le frottement des coussins pourra lui donner à nouveau une électrisation positive.

Pour éviter les pertes par le contact avec l'air, on recouvre souvent d'une enveloppe de soie le disque dans les parties où il est électrisé, c'est-à-dire entre chaque coussin et le peigne dans le sens de la rotation.

81. Machines de Nairne, de van Marum. — La machine de Ramsden ne peut donner que les effets dus à l'électrisation posi-

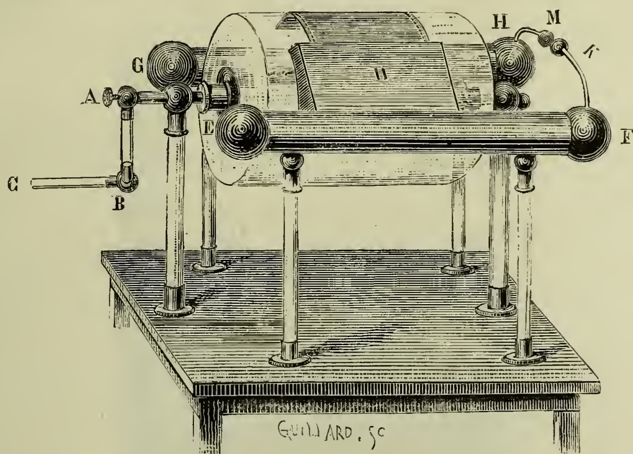


Fig. 44.

tive; on a imaginé diverses dispositions propres à recueillir à volonté l'une ou l'autre des électricités.

Dans la machine de Nairne (fig. 44) le disque est remplacé par un cylindre mobile autour de son axe placé horizontalement, il n'y a qu'un coussin et un seul peigne diamétralement opposés et portés chacun par un conducteur isolé EF, GH pouvant servir de collecteur. En mettant le coussin en communication avec le sol par un conducteur métallique, le conducteur qui porte le peigne est électrisé *positivement* (comme dans la machine de Ramsden). Si c'est le peigne qui est en communication avec le sol, le conducteur qui porte le coussin est chargé négativement. Si, enfin, les deux conducteurs sont isolés, ils se chargent contrairement, l'un positivement, l'autre négativement.

La machine de van Marum a, d'une manière générale, la disposition de la machine de Ramsden, seulement les coussins sont portés par un support isolant et les peignes ne sont pas liés invariablement aux conducteurs collecteurs : les communications peuvent être établies par l'intermédiaire de deux arcs métalliques dont l'un est relié au collecteur et l'autre au sol. Si le premier est en contact avec les peignes et le dernier avec les coussins, la machine fonctionne absolument comme la machine de Ramsden. Dans le cas d'une disposition inverse, il est facile de voir que les peignes sont maintenus à l'état neutre et que le collecteur est amené à l'état négatif.

82. Machine d'Armstrong. — Nous signalerons, sans insister longuement, la machine d'Armstrong (fig. 45), où l'électrisation est pro-

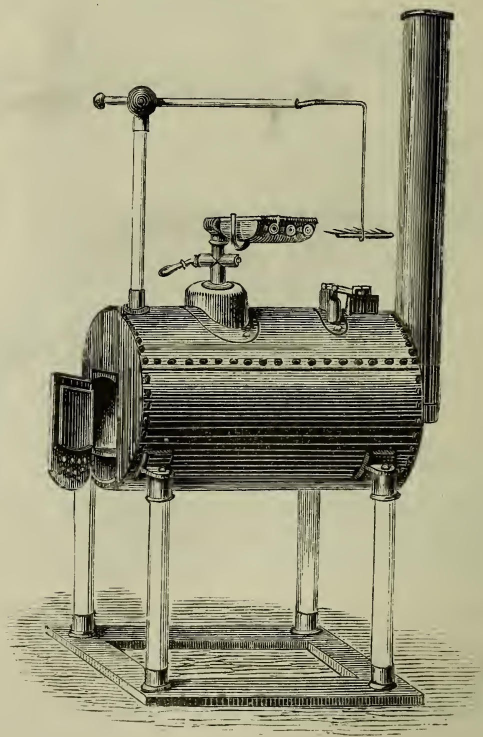


Fig. 45.

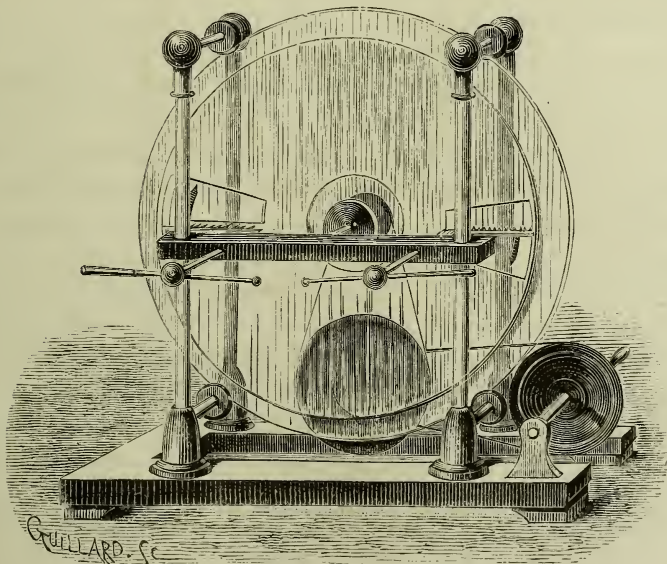
duite par le frottement d'un courant de vapeur. Un jet de vapeur fournie par une chaudière quelconque, chaudière ordinairement portée par des pieds isolants, passe, avant de s'échapper à l'air, dans

des ajutages de forme contournée pour augmenter le frottement; ce jet vient frapper une plaque munie de pointes communiquant avec un conducteur isolé.

Par le frottement les tubes s'électrisent, ainsi que la chaudière avec laquelle ils communiquent; le jet de vapeur s'électrise contrairement et vient se décharger sur la pointe tandis que le conducteur correspondant reste électrisé comme le jet.

Faraday a reconnu que l'électrisation ne se manifeste que si le jet de vapeur est humide, contient des gouttelettes d'eau en suspension (aussi les ajutages de sortie sont-ils placés dans une boîte refroidie par un courant d'eau); que l'air *humide* s'électrise dans les mêmes conditions, tandis que l'air sec ne s'électrise pas; que l'eau ne doit pas contenir de sels en dissolution ; que le sens de l'électrisation dépend de la nature des ajutages, ainsi que des corps tels que huiles, essences qui peuvent être en suspension dans l'eau.

83. Machine de Holtz. — Depuis quelques années on a construit des machines de diverses formes dans lesquelles l'électricité



Fig, 46.

que l'on recueille n'est pas obtenue directement par le frottement. Nous signalerons les modèles que l'on rencontre le plus souvent et, d'abord, la machine de Holtz (fig. 46).

Cette machine comprend un plateau de verre vertical tournant avec une assez grande rapidité autour d'un axe horizontal et de chaque côté duquel sont situés, à une petite distance, d'une part un plateau de verre fixe, et d'autre part des peignes.

Le plateau de verre fixe présente sur le diamètre horizontal des fenêtres ou ouvertures dont la forme est indifférente : des rectangles de papier sont collés sur le verre, affleurant le bord de ces ouvertures et terminés par des pointes qui, à travers les ouvertures, se dirigent vers le disque mobile et en sens contraire du sens de la rotation qui est imprimée à celui-ci.

Les peignes, au nombre de deux, sont rectilignes et placés aux extrémités du diamètre horizontal de manière à être en face des ouvertures dont ils sont séparés par le disque mobile : ils sont reliés à des conducteurs métalliques portés par des pieds isolants et terminés par des tiges munies de boules que l'on peut écarter plus ou moins.

Pour faire fonctionner la machine, dont toutes les parties doivent avoir été soigneusement séchées, on approche au contact les deux boules de manière à réunir métalliquement les deux peignes; puis à l'aide d'un corps électrisé quelconque, généralement une palette de caoutchouc durci que l'on a frottée avec une peau de chat, on touche une des feuilles de papier qui s'électrise par contact et l'on fait tourner le plateau; au bout de quelques instants, on peut retirer la palette de caoutchouc, la machine est amorcée : on continue encore à tourner et alors, en écartant progressivement les tiges métalliques, un flot d'électricité passe de l'une à l'autre. Il faut avoir soin de ne pas écarter trop, car en peu de temps la machine serait désamorcée; elle serait désamorcée plus rapidement encore, bien entendu, si l'on tournait le plateau en sens contraire.

L'électricité que l'on obtient ainsi est à une faible tension et donne des lueurs, des aigrettes, et non des étincelles. Lorsque l'on veut obtenir des étincelles, on fait communiquer les conducteurs métalliques avec deux bouteilles de Leyde montées en cascade (89) qui se chargent par la marche de la machine et qui, se déchargeant à travers les conducteurs et l'air, donnent de belles et fortes étincelles.

La théorie de cette machine n'est pas aussi simple que celle des machines à frottement; peut-être même les explications qu'on a données ne sont-elles pas entièrement satisfaisantes. Il importe de remarquer pour se rendre compte du fonctionnement que, par la marche même de la machine, la charge de la feuille de papier qui a été directement électrisée négativement augmente jusqu'à une certaine limite qui dépend des conditions de l'expérience

et que, en même temps, l'autre feuille se charge positivement.

Soit une machine de Holtz constituée par un plateau fixe portant les feuilles de papier A et B (fig. 47) munies respectivement des pointes *a* et *b*, par le plateau mobile CD et par les peignes P et Q reliés entre eux par les conducteurs PP'*p* et QQ'*q* ; ces diverses pièces sont supposées écartées bien que, en réalité, elles soient à de très petites distances les unes des autres.

Supposons que la feuille A reçoive une charge négative : elle produira une influence sur le peigne P qu'elle chargera positivement en P tandis que, à cause de la continuité des conducteurs de P en Q, le peigne Q sera chargé négativement; celui-ci à son tour agira par influence sur la feuille de papier B qui sera chargée positivement, mais dont la pointe se chargera négativement.

A mesure que la charge négative diminue en *b*, l'influence de B sur le peigne Q augmente et par suite aussi la charge positive de P qui,

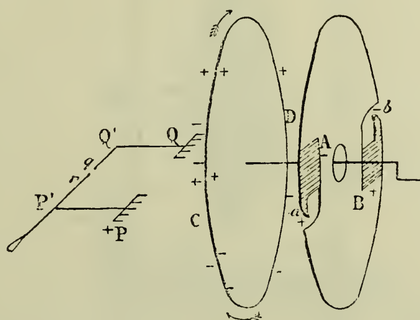


Fig. 47.

réagissant sur A, fera croître sa charge négative et amènera la pointe *a* à l'état positif.

Toutes les charges situées sur les pointes, tant en P qu'en Q et en *b*, tendraient à disparaître, et bientôt on arriverait à un état d'équilibre si le plateau CD ne tournait pas ; par suite de sa rotation, voici ce qui se produit :

En passant devant la pointe *b* le verre du plateau mobile s'électrise négativement à droite; il s'électrise aussi négativement à gauche sous l'action du peigne Q ; ces charges subsistent dans tout le demi-cercle inférieur, jusqu'au niveau de la pointe *a* qui, chargée positivement, neutralise d'abord le plateau, puis le charge positivement ; à gauche le peigne P produira le même effet et le plateau restera chargé positivement sur ses deux faces dans tout le demi-cercle supérieur.

On voit que, par ces actions, les pointes seront toujours sollicitées à se mettre en équilibre électrique, puisque, à chaque instant, elles se trouvent en présence de points électrisés contrairement; d'autre part, les actions qui se produisent en *a* et en *b* ont nécessairement pour effet d'accroître les charges de A et de B. Par suite aussi, l'influence sur les peignes P et Q sera de plus en plus considérable et les conducteurs de P à Q seront traversés par un flux croissant d'électricité. Il arrivera même, à partir d'un certain instant, qu'il ne sera pas arrêté par une solution de continuité et que l'on pourra écarter les tiges *p* et *q*.

84. Machines de Bertsch, de Carré. — La machine de Bertsch

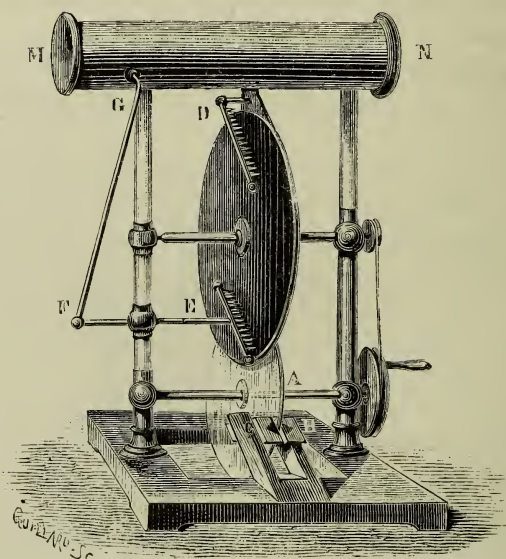


Fig. 48.

comprend un plateau de caoutchouc durci tournant autour de son axe : d'une part se trouve une palette fixe de même matière préalablement électrisée par le frottement, de l'autre deux peignes diamétralement opposés et reliés entre eux par des conducteurs que l'on peut séparer à un instant donné. Les effets sont à peu près les mêmes : l'influence de la palette sur les peignes se produit d'une façon analogue, chacun de ceux-ci se décharge sur le plateau, parce que ce plateau a été chargé contrairement par l'autre peigne. Mais il n'y a pas de réaction sur la palette excitatrice qui, peu à peu, se décharge par son contact avec l'air, et la machine cesse de fonctionner au bout d'un certain temps

Pour éviter cet inconvénient, M. Carré a remplacé la palette fixe par un second plateau en caoutchouc durci ou en verre A (fig. 48), de moindres dimensions que le premier, mis en mouvement par la rotation même du premier qui lui est communiquée par une courroie sans fin, et passant entre deux coussins B qui lui rendent à chaque instant la charge électrique qu'il a perdue. Le fonctionnement est évidemment le même que celui de la machine de Bertsch, sauf qu'il peut être continué indéfiniment.

85. Condensation électrique. — Le *condensateur à plateaux* d'Æpinus se compose de deux plateaux métalliques AB et CD (fig. 49) montés sur des pieds isolants F,K; ceux-ci sont reliés à des crémaillères engrenant avec un pignon denté de telle sorte que les plateaux peuvent, à volonté, s'éloigner ou s'approcher. Un support intermédiaire peut soutenir un disque de matière isolante; on emploie en général du verre, mais on peut également remplacer cette substance par une autre dans le cas où l'on veut faire des expériences comparatives. Chacun des plateaux A et B porte un petit pendule m,n, sur la face opposée au disque isolant.

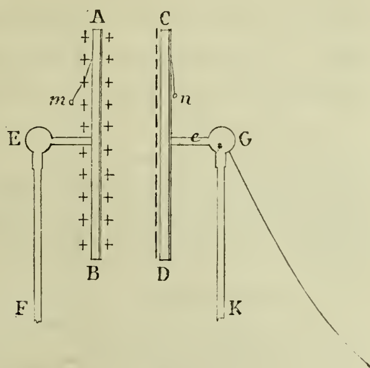


Fig. 49.

Cet appareil permet d'obtenir plusieurs effets importants que nous allons indiquer.

Supposons d'abord que les deux plateaux métalliques étant placés à la plus grande distance possible l'un de l'autre, on fasse communiquer, par un conducteur métallique, le plateau A avec une machine électrique que l'on met en mouvement. On verra très rapidement le pendule m s'écarter de la verticale et atteindre une position presque horizontale qu'il ne dépassera pas : on dit alors que l'appareil est *chargé à refus ;* on aura une idée de son état électrique soit par le nombre de tours de la machine qu'il a fallu faire pour arriver à cet équilibre, soit par la grandeur de l'étincelle que l'on obtient lorsqu'on en approche le doigt, soit plus exactement par une mesure faite à l'aide de la balance de Coulomb.

Le plateau A ayant été ramené à l'état neutre, rapprochons les plateaux l'un de l'autre, jusqu'à les mettre en contact avec le disque isolant par exemple (cette condition n'est pas nécessaire, mais elle rend les effets plus marqués); la communication avec la machine

existant toujours, et celle-ci étant mise en mouvement, tandis que le plateau C est en communication avec le sol, nous observerons que le pendule s'écarte de la verticale mais plus lentement que dans le cas précédent et que, pour arriver au refus, il faut que la machine ait exécuté un nombre de tours beaucoup plus considérable; en comparant l'électricité à un fluide matériel, à un gaz par exemple, et le plateau à un réservoir, on a pu dire que puisque dans les deux cas ce réservoir était plein, l'état de refus étant atteint dans les deux cas, il fallait que dans le second état le fluide fût *condensé* par rapport à ce qu'il était dans le premier. L'influence du plateau C aura donc été d'établir sur le plateau A un état électrique beaucoup plus différent de l'état neutre que ne l'était l'état électrique précédent. C'est en se plaçant à ce point de vue que l'on a dit qu'il y avait sur A *condensation de l'électricité*, ou bien que le plateau A contenait de l'*électricité condensée*. Le plateau C dont la présence est la cause des effets qne nous venons d'indiquer est appelé plateau *condensateur;* le plateau A est le plateau *collecteur*.

On peut d'ailleurs vérifier en déchargeant le plateau que l'on a une étincelle beaucoup plus considérable, ce qui tend à prouver que ce plateau était plus éloigné de l'état neutre : il faut, pour que cet effet se manifeste, que le plateau C soit toujours en communication avec le sol, ou qu'il soit éloigné le plus possible.

Si, avant d'écarter les plateaux, on a rompu la communication de C avec le sol, on reconnaîtra de même que ce plateau C est chargé d'électricité en proportion considérable : il y a eu évidemment là une action d'influence (44) que l'on pouvait prévoir. Mais il faut remarquer que, dans ce cas, le plateau C est électrisé beaucoup plus fortement qu'il ne l'aurait été s'il avait été mis directement en communication avec la machine; de telle sorte que, par la même comparaison, on dit également qu'il y a condensation de l'électricité sur C.

Il va sans dire que l'électricité obtenue sur C est de sens contraire à celle qui existe sur A.

86. — La même expérience, modifiée en quelques détails, présente un intérêt réel et explique certaines expressions qui ont été autrefois employées.

Plaçons les plateaux A et C, rapprochés dans les mêmes conditions que précédemment, c'est-à-dire A en communication avec la machine et C en communication avec le sol, et chargeons A d'une quantité quelconque, mais non jusqu'au refus. Nous observons alors que le pendule m du plateau A sera quelque peu dévié de la verticale, mais que le pendule n du plateau B ne sera pas déplacé. Écartons main-

tenant les plateaux A et C : le pendule *m* arrivera presque à l'horizontale et la déviation du pendule *n* sera très considérable, bien que toujours un peu plus faible que celle de *m*. Tout se passe donc comme si, lorsque les plateaux sont rapprochés, les quantités d'électricité qui agissent lors de l'écartement se trouvaient empêchées de produire leur action; c'est ce que l'on exprime en disant que dans ce cas l'électricité est *dissimulée*.

En réalité, il n'y a rien de *dissimulé*, pas plus que l'on ne peut dire proprement qu'il y a une *condensation*, puisque nous ignorons si la comparaison faite entre l'électricité et un fluide matériel est justifiée ; nous pouvons cependant accepter ces expressions, à la condition qu'elles n'auront pas pour nous de sens propre et qu'elles représenteront seulement les faits que nous venons de signaler.

Les faits précédents ont leur explication fort simple dans la considération des forces électriques en jeu, comme il est facile de le prouver, sans qu'il soit nécessaire d'invoquer une propriété spéciale, particulière[1].

1. Soit un corps isolé A (fig. 50) mis en communication avec une source d'électricité M par un conducteur, et soit *m* un point de ce conducteur : considérons l'instant où A s'est déjà électrisé et supposons que l'électrisation soit positive, par exemple.

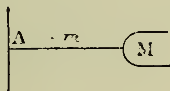


Fig. 50.

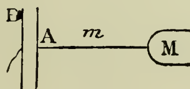


Fig. 51.

L'électricité du point *m* subit de la part de M une répulsion dépendant de la distance et du potentiel de M, et en même temps une force répulsive émanée de A qui, pour la distance considérée, dépend de la quantité d'électricité de A ; cette dernière, nulle au début, alors que A est à l'état neutre, ira en augmentant, et à un certain moment deviendra égale à l'action exercée par M : à ce moment toute molécule telle que *m*, qui primitivement aurait été repoussée, reste en équilibre sous l'action de deux forces opposées, le plateau A est chargé à *refus*.

Si maintenant dans le voisinage on place le plateau B (fig. 51) communiquant avec le sol, il sera dès lors influencé et se trouvera électrisé négativement. Dans ce cas, la molécule *m* que nous avons considérée sera soumise à l'action de la force μ émanée de M, force constante, à la force α, opposée à μ, émanant de A et égale à μ, et à une force attractive β émanée de B; l'action définitive ne sera donc pas nulle et la molécule électrique *m* sera attirée sur A dont elle augmentera la charge, ce qui augmentera la force α; mais par là aussi se trouvera accrue par influence la charge de B et par suite la force β. Si ces deux forces α et β croissaient également, l'équilibre de *m* ne pourrait jamais être atteint; mais il n'en est pas ainsi, d'abord parce que B est plus loin que A et ensuite parce que l'électrisation de B est mesurée par un nombre moindre que celle de A. Il en résulte qu'à un certain

87. — L'importante expérience de la condensation électrique paraît avoir été réalisée expérimentalement par Cuneus, élève de Musschenbrock : il cherchait à électriser de l'eau placée dans un vase de verre et dans laquelle plongeait une tige métallique qu'il approchait d'une machine électrique, tandis qu'il tenait le vase à la main. On voit que dans ce cas il réalisait les conditions propres à manifester la condensation, l'eau jouant le rôle de collecteur et la main en communication avec le sol remplissant le rôle du plateau condensateur. Il remarqua qu'en touchant avec l'autre main la tige métallique, il éprouvait une secousse beaucoup plus forte que celles que donnait la machine et telle, dit-il, qu'il ne voudrait pas s'y exposer de nouveau, fût-ce au prix d'un royaume.

88. — Nous avons indiqué les circonstances principales qui accompagnent la charge d'un condensateur : nous devons maintenant expliquer les phénomènes qui se produisent lorsqu'on le décharge.

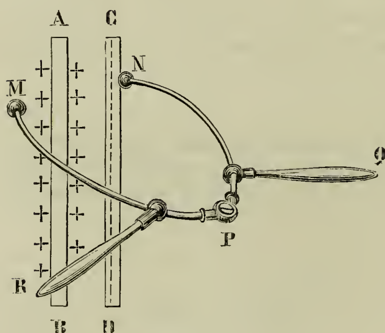


Fig. 52.

Le plateau condensateur C communiquant toujours avec le sol, si l'on vient à mettre également en communication avec le réservoir commun le plateau collecteur A, on observera une étincelle très forte et les deux plateaux seront ramenés à l'état neutre.

On peut, après avoir supprimé la communication de C (fig. 52) avec le sol, chercher à établir une communication entre les deux plateaux, à l'aide de l'*excitateur à manches de verre* MNPQR par exemple, appareil dont le fonctionnement se comprend immédiatement et qui a pour effet de soustraire l'expérimentateur à la secousse électrique. Dans ce cas on observe une étincelle presque aussi forte que précédemment, mais on reconnaît ensuite que les deux plateaux sont encore chargés, quoique faiblement, et que leur électrisation est la même que celle

moment la différence des valeurs successives de α et β sera égale à μ ; à ce moment la molécule m sera en équilibre et le condensateur A sera chargé à refus. Seulement, pour arriver à ce résultat il faudra que le plateau A soit chargé beaucoup plus fortement que s'il n'y avait pas le plateau B.

On voit donc, par cette analyse rapide, que la condensation électrique s'explique simplement par le jeu des forces électriques, sans qu'il soit nécessaire d'imaginer des actions particulières.

qui existait primitivement sur A. Ce résultat est conforme à l'idée que C, étant chargé par l'influence de A, ne peut être électrisé aussi énergiquement que ce dernier plateau.

Enfin, on peut opérer par décharges successives : pour cela, les deux plateaux étant maintenus isolés, on les touche alternativement avec le doigt ou avec un conducteur communiquant au sol. Il est clair que si l'on commençait à toucher C, il ne se produirait rien, puisque ce plateau avait été préalablement en équilibre avec le réservoir commun; mais si au contraire on vient à toucher A, on observera une légère étincelle : le pendule m s'abaissera immédiatement et le pendule n s'élèvera. L'effet est facile à comprendre : l'équilibre avait existé, C étant en communication avec le sol et son pendule restant vertical, tandis que A isolé était plus fortement électrisé et que son pendule était dévié; si A est maintenant en communication avec le sol tandis que C reste isolé, les rôles sont changés et A devra se trouver, lors de l'équilibre, moins électrisé que C; donc m devra retomber et n devra s'écarter; ce qui est conforme à l'expérience.

On conçoit que dès lors, en touchant C, on reproduira les mêmes effets en sens contraire, et que l'on tirera de C une étincelle qui sera suivie du retour de n à la verticale et de l'écartement de m. Les mêmes actions se produisent longtemps de la même manière, en touchant successivement A et C. Théoriquement même, l'effet pourrait se continuer indéfiniment; car, chaque fois, on n'enlève sur chaque plateau qu'une partie de l'électricité qui y existe. En réalité, après un certain nombre de contacts, on n'observe plus rien, parce que les actions deviennent assez petites pour être insensibles, et parce que, à cause des pertes par l'air et par les supports, la tendance au rétablissement de l'équilibre se manifeste de plus en plus et que cet état d'équilibre s'établit effectivement.

L'expérience se fait souvent en disposant deux boules qui sont en rapport chacune avec une des armatures du condensateur, et en disposant entre ces boules un corps mis en communication avec le sol et susceptible d'osciller; ce corps sera attiré par l'armature sur laquelle se trouve l'excès d'électricité, la touchera et enlèvera tout ce qui n'est pas retenu par l'autre armature; mais alors c'est celle-ci qui est la plus chargée, qui attire le corps oscillant, et ainsi de suite.

89. Bouteille de Leyde. — Le condensateur à plateaux, dont la forme se prête bien à l'exposé théorique des phénomènes que nous étudions, ne donne pas de bons résultats lorsque l'on veut seule-

ment obtenir des effets intenses par la condensation. On emploie alors des *bouteilles de Leyde* (fig. 53) ou des *jarres électriques* (fig. 54).

Les unes et les autres consistent en vases de verre sur la face extérieure desquels on a collé des feuilles d'étain constituant ce que l'on nomme l'armature extérieure; des corps conducteurs forment, dans le vase, l'armature intérieure. Dans les jarres, le vase étant un bocal à large goulot, cette armature est constituée par une autre feuille d'étain collée intérieurement; les bouteillès de Leyde proprement dites ayant un goulot étroit, l'armature intérieure est alors constituée seulement par des feuilles de clinquant que l'on a introduites dans le vase. Dans l'un et l'autre cas, le vase est fermé par un bouchon que l'on recouvre de cire pour le rendre plus isolant et que traverse une tige métallique terminée extérieurement

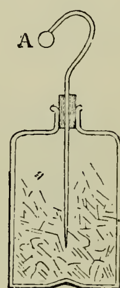


Fig. 53.

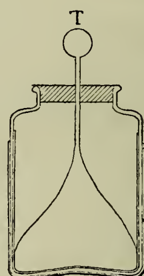


Fig. 54.

par une boule, souvent recourbée en crochet et qui, par sa partie inférieure, se trouve en contact intime avec l'armature intérieure. Ajoutons que, souvent, la partie inférieure du vase est concave et que dans la cavité ainsi produite on fixe un crochet qui se trouve en communication métallique avec l'armature extérieure.

Pour charger une bouteille de Leyde, on la tient généralement à la main par la panse, mettant ainsi l'armature extérieure en communication avec le sol, et l'on approche le crochet du conducteur d'une machine électrique en action : l'armature intérieure joue alors le rôle de collecteur et l'armature extérieure celui de condensateur. Quelquefois on suspend la bouteille au conducteur par la tige recourbée et l'on adapte au crochet inférieur une chaîne qui, par l'autre extrémité, repose sur le sol.

Il est clair que l'on peut charger la bouteille inversement, en la

tenant à la main par la tige métallique et présentant à la machine la panse ou armature extérieure.

On peut enfin charger en même temps plusieurs bouteilles de Leyde en les suspendant l'une au-dessous de l'autre, en nombre quelconque, la première étant portée par le conducteur de la machine à l'aide de la tige recourbée, et chacune des suivantes étant portée, de la même manière, par le crochet inférieur de la bouteille située au-dessus, le crochet de la dernière bouteille étant en communication avec le sol par une chaîne ; c'est ce que l'on appelle la charge en cascade.

90. Role des diélectriques dans la condensation. — Dans l'explication que nous avons indiquée de la condensation électrique, nous avons considéré la lame de verre comme s'opposant seulement au rétablissement direct de l'équilibre électrique entre les deux

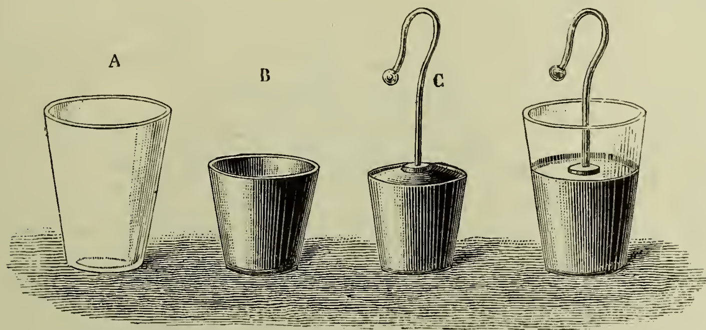


Fig. 55.

armatures. Or il est facile de prouver que la question n'est pas aussi simple et que la lame isolante a un rôle direct et spécifique.

C'est ce que montre d'abord la bouteille à armatures mobiles (fig. 55), dans laquelle les armatures sont constituées par des parties métalliques rigides B et C qui s'appliquent à l'intérieur et à l'extérieur d'un vase conique en verre A. Lorsque les trois parties sont placées l'une dans l'autre, on a une bouteille de Leyde susceptible de produire tous les effets des bouteilles précédemment décrites. Considérons une semblable bouteille préalablement chargée et posée sur un plateau isolant, un gâteau de résine, par exemple ; nous pourrons enlever, soit à la main, soit à l'aide d'un crochet de verre, l'armature intérieure qui sera ramenée à l'état neutre en la touchant ; séparons le vase de verre que nous poserons sur la résine, puis touchons également l'armature extérieure qui sera ainsi ramenée aussi à l'état

neutre. Si alors nous reconstituons la bouteille, nous observerons qu'elle donnera une étincelle presque aussi forte que si elle n'avait pas subi cette manipulation. Donc ce n'étaient pas les armatures qui présentaient les états électriques particuliers produits par la condensation, c'étaient les surfaces mêmes du verre.

On a démontré d'autre part que la lame isolante interposée entre les plateaux métalliques a un rôle spécifique, et qu'elle n'est pas seulement un obstacle au rétablissement de l'équilibre électrique. Voici, par exemple, une expérience due à Faraday :

On place parallèlement trois lames métalliques isolées, A, B et C (fig. 56) ; les deux lames extrêmes communiquent avec deux feuilles d'or *a* et *c* ; on charge légèrement la lame intermédiaire B qui est placée à égale distance des deux autres : il y a aussitôt action d'influence, les lames *a* et *c* se chargent semblablement au corps influençant B et, par suite, divergent. On touche alors les deux lames qui, mises en communication avec le sol, se déchargent et les feuilles d'or retombent, les lames A et C restent chargées contrairement à B.



Fig. 56.

Entre les lames A et B, par exemple, et sans rien changer aux distances, on interpose une lame de verre, de soufre, etc., et aussitôt les feuilles divergent : donc les lames ont subi une modification dans leur électrisation et, comme C est dans les mêmes conditions, il faut admettre que le changement vient de A. On voit que la seule différence entre les deux parties de l'expérience consiste en ce qu'une certaine couche d'air a été remplacée par une autre couche d'une substance différente mais également isolante : il faut donc admettre que ces deux couches que l'on a substituées l'une à l'autre ne sont pas équivalentes au point de vue électrique, que chacune a un caractère propre, un rôle spécifique.

Nous devons nous borner à ces indications générales qui trouvent naturellement leur place dans la théorie du condensateur ; mais nous ne pouvons insister sur ce point, non plus que sur la théorie particulière de l'influence à travers les corps mauvais conducteurs, les résultats obtenus jusqu'à présent ne permettant pas d'arriver à des énoncés généraux.

91. Formes diverses des condensateurs. — Nous avons indiqué déjà deux formes de condensateurs, le condensateur à plateaux d'Æpinus et la bouteille de Leyde : il peut être utile de donner à cet appareil d'autres formes que nous allons indiquer sommairement.

Le carreau magique est un condensateur formé par deux lame d'étain collées sur les deux faces d'une plaque de verre ; on le charge en mettant une des feuilles en communication avec la machine et l'autre en communication avec le sol.

Dans quelques cas, comme nous le verrons plus tard, il est utile d'avoir des condensateurs présentant une grande surface ; on les obtient en intercalant des feuilles d'étain entre des morceaux d'un corps isolant tel qu'une étoffe de soie, du papier paraffiné, etc. On fait dépasser d'un côté toutes les feuilles d'étain de rang pair dont on relie les bords par une lame conductrice, et de l'autre les feuilles de rang impair que l'on réunit de même : ce sont ces conducteurs que l'on met en communication l'un avec la machine, l'autre avec le sol pour charger le condensateur.

On emploie également des batteries électriques (fig. 57) constituées

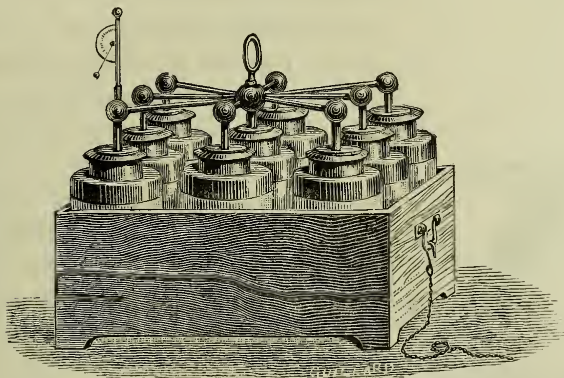


Fig. 57.

par un certain nombre de bouteilles ou de jarres dont toutes les armatures intérieures communiquent ensemble, de même que toutes les armatures extérieures : tout se passe comme si l'on avait un seul condensateur dont la surface serait égale à la somme des surfaces des différentes jarres.

En un mot, d'une manière générale, il se produira des phénomènes de condensation toutes les fois que deux conducteurs seront séparés par un corps isolant : nous en signalerons un exemple intéressant en parlant de l'établissement du courant dans des câbles sous-marins.

92. Électromètre condensateur. — Dans les cas que nous avons examinés, le but que l'on se propose par l'emploi du condensateur, c'est d'obtenir des effets plus puissants que ceux que

pourrait donner la source d'électricité dont on dispose; mais on peut avoir recours à la condensation pour mettre en évidence, par le même procédé, de très faibles traces d'électricité. On emploie pour cela l'électromètre condensateur (fig. 58) : cet appareil consiste en un électroscope à feuilles d'or dont la boule a été remplacée par un plateau métallique AB recouvert à sa face supérieure d'un vernis isolant ; sur ce plateau on en place un second CD verni sur sa face inférieure et porté par un manche en verre EF. On voit que lorsque ce plateau est posé sur l'autre leur ensemble constitue un condensateur.

Pour se servir de cet appareil afin de reconnaître si un corps est chargé d'électricité, on le met en contact avec le plateau inférieur, par exemple; si celui-ci était seul, il serait chargé à refus avec une très petite quantité d'électricité et les feuilles divergeraient peu. Si l'on a posé le deuxième plateau sur le premier et qu'on l'ait mis en communication avec le sol, le plateau inférieur faisant partie d'un condensateur se chargera beaucoup plus, sans que cependant pour cela les feuilles divergent plus tout d'abord. Mais si, après avoir supprimé la communication avec le plateau inférieur, l'on enlève le plateau supérieur, l'électricité, qui était maintenue par la présence de celui-ci sur l'autre plateau, se répandra dans tout le système conducteur, et en particulier dans les feuilles d'or qu'elle fera diverger notablement.

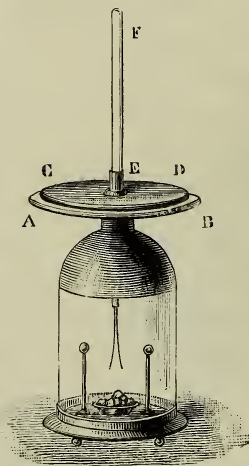


Fig. 58.

A l'aide de cet appareil, que l'on peut d'ailleurs remplacer par d'autres instruments plus usités maintenant, il est possible de mettre en évidence des traces très faibles d'électrisation.

Nous signalerons seulement pour mémoire et sans nous y arrêter un appareil qui n'est qu'une extension de l'électromètre condensateur: l'électromètre à trois plateaux de Peltier.

93. Capacité électrique. — La quantité d'électricité nécessaire pour amener à l'état de saturation un corps conducteur isolé, d'un poids donné, dépend de la forme et de la surface qu'il présente ; on aura une idée des variations qui peuvent se manifester en comptant le nombre de tours d'une machine qui, mise en commu-

nication avec différents corps, les a amenés à cet état de saturation. Il y a donc là un élément caractéristique pour un corps donné, élément qu'il s'agit de mieux caractériser.

Au lieu d'amener un corps à saturation, on peut imaginer qu'on le fasse passer du potentiel 0 au potentiel 1, et la quantité d'électricité nécessaire à produire cette modification est ce que l'on appelle la *capacité électrique* du corps considéré (comparer cet élément avec la chaleur spécifique ou capacité calorifique d'un corps). Les potentiels étant proportionnels aux charges, on voit que si une quantité e d'électricité a amené un corps au potentiel V, sa capacité électrique c sera donnée par la formule :

$$c = \frac{e}{V}.$$

On peut dans quelques cas simples déterminer facilement par le calcul comment varie la capacité dans certaines circonstances données ; par exemple, on trouve que les capacités de sphères conductrices, de rayons différents, sont entre elles comme les rayons.

La question de capacité est toujours moins simple qu'elle ne le serait dans le cas précédent, où nous avons supposé implicitement que le corps considéré existait seul ; en réalité le corps est en présence d'autres conducteurs dont il est séparé par une couche d'air, rendue isolante, et fait partie, par suite, d'un condensateur. Ce que l'on peut ainsi déterminer, c'est la *capacité électrique* de ce condensateur, capacité qui varie, pour un même corps, avec tous les éléments des autres parties du condensateur, et notamment avec la nature et l'épaisseur de la couche isolante. Si cette couche isolante est assez épaisse, on peut admettre que les variations d'épaisseur qui pourraient se présenter seraient sans influence, et la capacité ne dépend plus que de la forme et des dimensions du conducteur considéré, ainsi que de la nature de l'isolant.

Lorsque l'on étudie la capacité d'un condensateur proprement dit, il convient naturellement de prendre des formes simples, par exemple, des sphères concentriques, des cylindres de même axe. On reconnaît alors, comme il est facile de le prévoir d'ailleurs, que la capacité croît avec la surface des conducteurs et dépend de l'épaisseur, croissant quand l'épaisseur diminue. La nature de l'isolant influe également, comme nous l'avons dit ci-dessus, ce qui montre que les actions d'influence ne sont pas seulement des actions à distance, mais que l'isolant, le diélectrique interposé joue un rôle actif.

Si l'on considère deux condensateurs de même forme et de mêmes dimensions et dans lesquels les couches isolantes, de même épaisseur, sont un corps diélectrique quelconque pour le premier et une couche d'air sec pour le second, on appelle *pouvoir inductif spécifique* du diélectrique considéré le rapport des capacités électriques des deux condensateurs (quelques auteurs emploient l'expression *capacité inductive spécifique*, qui nous paraît moins bonne).

94. Effets des étincelles. — Décharge disruptive. — Les décharges d'électricité produisent des effets différents suivant les circon-

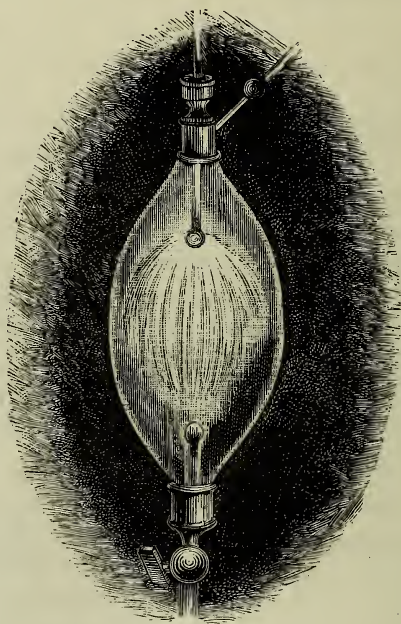


Fig. 59.

stances dans lesquelles elles se produisent et principalement suivant qu'elles se manifestent entre des corps dont la différence de potentiel est forte ou faible, et aussi suivant la pression de l'atmosphère gazeuse dans laquelle se trouvent placés les corps électrisés.

Si la différence de potentiel est faible, la décharge électrique ne peut se produire que si la pression est faible également : l'effet produit se manifeste, en sus du retour à l'équilibre électrique, par des lueurs violacées, peu éclairantes et que l'on ne peut apercevoir en général que s'il n'y a pas de lumière ambiante. Ces lueurs sont d'autant plus larges que la pression est moindre : si dans un vase

on a fait le vide à l'aide d'une bonne machine pneumatique, la lueur paraît remplir complètement le vase; c'est là ce qui constitue l'*œuf électrique* (fig. 59). Ces effets, qui ne donnent pas lieu à des phénomènes visibles en plein jour, correspondent à ce que l'on a appelé quelquefois des décharges invisibles. Il semble cependant qu'il n'y ait pas à proprement parler de décharges invisibles, à la condition d'opérer dans l'obscurité absolue. Ces décharges qui se manifestent dans les gaz à faible pression, outre leur action physiologique sur l'œil, paraissent spécialement propres à donner naissance à des phénomènes chimiques. Nous reviendrons ultérieurement sur les applications qui ont été faites de ces décharges faibles, obscures, de ces *effluves électriques* comme on dit aussi, en indiquant les meilleures conditions dans lesquelles il convient de se placer pour produire des effets notables.

Il importe de remarquer que si, en faisant le vide, on dépasse une certaine valeur de la pression de manière à se rapprocher autant que possible du vide absolu, les décharges électriques cessent absolument de se manifester, comme s'il fallait l'existence d'un milieu matériel pour donner passage à l'électricité (74).

95. — Si le gaz dans lequel on opère possède une pression comparable à la pression atmosphérique, et si la distance entre les deux corps qui présentent une certaine différence de potentiel n'est pas très petite, la décharge qui ramène ces corps à l'état d'équilibre électrique ne peut se produire que si la différence du potentiel a atteint une certaine valeur, et elle se manifeste alors par la production de l'*étincelle électrique* ou par celle d'aigrettes.

L'étincelle se produit entre deux corps terminés par des surfaces arrondies; l'aigrette correspond au cas où l'un des corps est terminé par une pointe. Celle-ci prend naissance quelquefois même lorsqu'un seul corps présentant une pointe est porté à un potentiel très différent de celui de l'atmosphère ambiante : la décharge par aigrette se produit alors entre le corps et l'atmosphère même.

L'étude de l'étincelle électrique a été l'objet de nombreuses recherches qui, il faut le reconnaître, ont beaucoup perdu de leur importance : aussi ne nous arrêterons-nous que peu sur ce sujet.

L'étincelle se manifeste tout d'abord par les effets physiologiques qu'elle produit : elle apparaît sous forme d'un trait lumineux en zigzag, de très courte durée, accompagné d'un bruit plus ou moins sec, mais caractéristique et facilement reconnaissable. Sa couleur généralement bleue ou violacée dépend, en partie au moins, des corps entre lesquels elle éclate et des gaz dans lesquels elle se produit.

Indépendamment des actions lumineuses et acoustiques, il convient d'ajouter que l'étincelle électrique, éclatant sur un point quelconque de la peau, produit une sensation spéciale, piqûre, choc ou secousse qui s'étend à une distance variable, dépendant et du point touché et de l'intensité de l'étincelle. Si l'étincelle produit son action plus directement sur des muscles ou sur des nerfs, elle est susceptible de mettre en jeu leur activité propre et de produire des mouvements involontaires, même lorsque les organes étudiés appartiennent à un animal mort depuis un certain temps.

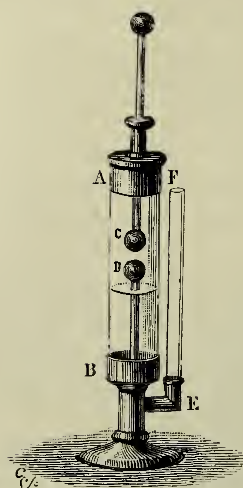


Fig. 60.

L'étincelle électrique produit des phénomènes calorifiques, ainsi que cela peut être mis en évidence par le thermomètre de Kinnersley (fig. 60), par exemple, dans lequel l'action calorifique se manifeste par la dilatation de l'air traversé par l'étincelle. L'élévation de température peut également amener l'inflammation de corps facilement combustibles, comme l'éther (fig. 61) : il peut n'être pas sans intérêt de remarquer que, dans ce cas, l'inflammation semble produite par la vapeur d'éther et est seulement alors communiquée au liquide.

C'est également à l'élévation de température qu'il faut attribuer l'inflammation de quelques mélanges détonants comme, par exemple, le mélange d'oxygène et d'hydrogène dans le *pistolet de Volta*


Fig. 61.

(fig. 62), dont le fonctionnement est aisé à comprendre. Cette action est utilisée dans les eudiomètres. Peut-être existe-t-il des cas où l'action chimique se manifeste directement.

Dans d'autres circonstances l'action d'une étincelle ou d'une série d'étincelles produit une décomposition chimique, comme c'est

le cas pour l'ammoniaque qui est décomposée en azote et hydrogène.

Les actions chimiques de l'étincelle électrique doivent être étudiées à nouveau, et les résultats obtenus devront être comparés avec ce que l'on connaît des phénomènes calorifiques dans leurs relations avec les combinaisons et décompositions chimiques telles qu'elles résultent des travaux de M. Berthelot. Les données recueillies jusqu'à présent sont insuffisantes pour permettre d'indiquer des résultats précis.

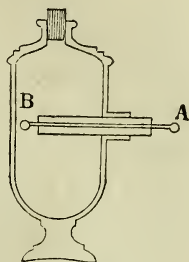
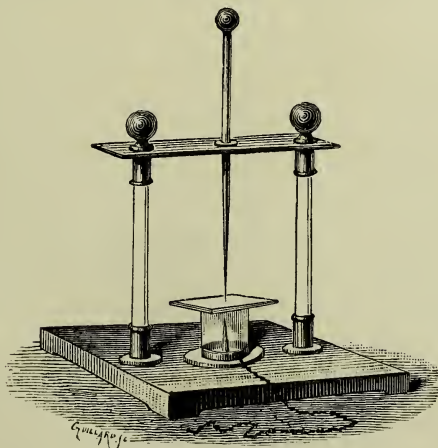


Fig. 62.

Enfin les étincelles électriques peuvent donner lieu à des effets mécaniques : si elles sont produites par une différence de potentiel suffisante, elles peuvent traverser les substances isolantes en les perforant. On peut ainsi percer une lame de carton ou même une lame de verre présentant une épaisseur notable (perce-verre, fig. 63).

Mais certaines actions que l'on pourrait tout d'abord rattacher à des effets mécaniques peuvent être en réalité la conséquence de phénomènes calorifiques. Par exemple, la rupture de morceaux de bois peut être produite par la vaporisation brusque de l'eau que contiennent les tissus. Il y a transport des métaux de l'un à l'autre


Fig. 63.

des points entre lesquels éclate l'étincelle, mais ce transport peut se produire seulement après que les corps ont été volatilisés et provenir de la répulsion qu'éprouvent alors les diverses parties semblablement électrisées, etc.

Les aigrettes ne paraissent pas susceptibles de produire des effets aussi variés que les étincelles : elles sont visibles et présentent des aspects variables suivant les circonstances, et de plus peuvent être accompagnées d'un bruissement plus ou moins fort. Elles ne produisent pas d'effets calorifiques ou mécaniques notables ; les actions physiologiques se réduisent à peu de chose, notamment à l'action du vent électrique, sensation spéciale que l'on éprouve lorsque l'on approche la main ou la figure d'une pointe placée sur un corps électrisé : cette sensation paraît tenir en partie aux mouvements que prennent les poils qui, s'électrisant, s'écartent les uns des autres et se redressent, en partie au courant d'air qui, comme nous l'avons dit, se produit effectivement (59). Il est possible cependant que l'action de l'électricité dans ces conditions ne soit pas sans une influence directe sur l'organisme à l'état physiologique, ou au moins à l'état pathologique.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

96. Construction empirique d'un élément de pile. — Considérons un assemblage construit empiriquement ainsi qu'il suit : dans un vase contenant de l'eau acidulée, par exemple avec de l'acide sulfurique, plongent une lame de zinc AA′ (fig. 64) et une lame de cuivre ou de platine BB′ auxquelles sont attachés des fils conducteurs ; c'est là ce qui constitue un *élément de pile*, les lames métalliques sont les *électrodes* et les extrémités des fils de cuivre les *réophores ;* lorsque ces réophores sont en contact, on dit qu'on a *fermé le circuit;* le *circuit est ouvert* lorsqu'il existe dans le fil une solution de continuité qui n'est pas comblée par un corps conducteur solide ou liquide.

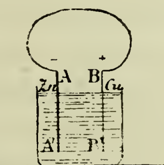


Fig. 64.

Un semblable appareil ne donne lieu à aucun phénomène qui soit immédiatement observable, que le circuit soit ouvert ou qu'il soit fermé; il n'est le siège d'aucun phénomène lumineux et ne produit aucune action calorifique directement appréciable (non que cette action n'existe pas, mais elle est trop faible dans ces conditions pour être perçue), il ne donne lieu non plus à aucune sensation lorsqu'on touche le fil qui réunit les électrodes.

Cet élément de pile est cependant le siège d'actions spéciales, mais elles exigent des soins particuliers et des appareils de précision pour être mises en évidence; on peut d'ailleurs parvenir à amplifier assez ces actions pour qu'elles soient facilement appréciables. Quoi qu'il en soit, même avec un seul élément, on peut faire les vérifications suivantes :

A l'aide d'un électromètre condensateur (92) ou d'un électromètre de Thomson (63), on reconnaît que le circuit étant ouvert les rhéophores ne sont pas au même potentiel, celui qui est en communication avec le platine étant électrisé positivement, celui qui est relié au zinc étant électrisé négativement.

D'autre part, si l'on place les rhéophores sur les côtés de la langue de manière à ce que celle-ci complète le circuit, on éprouve immé-

diatement une sensation particulière qui cesse lorsque le circuit vient à être rompu. Il est facile de reconnaître que ce phénomène subjectif est réellement relié à une action objective, car si l'on ferme le circuit en interposant entre les rhéophores une grenouille préparée (train postérieur d'une grenouille que l'on a dépouillée de la peau), on voit celle-ci éprouver des secousses violentes. Un muscle quelconque interposé dans le circuit éprouverait d'ailleurs des effets analogues.

97. — Il est aisé, en admettant l'hypothèse qui nous a servi à expliquer les phénomènes de l'électricité statique, de nous rendre compte de ce qui doit se passer dans les circonstances que nous venons d'indiquer. Les deux électrodes se trouvaient dans des états électriques différents et lorsqu'ils ont été réunis par un conducteur ils ont été ramenés à l'équilibre électrique, c'est-à-dire que l'électricité + ou en excès sur le platine s'est rendue sur le zinc où il y avait manque d'électricité, jusqu'à ce que le potentiel fût devenu le même : ce passage hypothétique de l'électricité, qui correspond certainement à une modification dont la véritable nature est encore inconnue, constitue ce que l'on nomme le *courant électrique* auquel on attribue un sens ou une direction comme s'il s'agissait d'un liquide s'écoulant dans un tuyau.

98. — L'expérience montre que l'on ne peut jamais, dans un élément de pile, arriver à obtenir l'équilibre électrique entre les deux pôles et que les deux états électriques primitivement observés se retrouvent sans modification aussitôt que l'on a rompu le circuit. Comme les effets par lesquels nous avons reconnu l'existence du courant persistent également tant que le circuit n'est pas rompu, nous sommes conduits à admettre que, pendant tout ce temps, la différence de potentiel est maintenue entre les deux pôles.

Pour expliquer que cette différence puisse ainsi subsister, on dit que la pile est le siège d'une *force électro-motrice*, dont nous chercherons plus tard le lieu et l'origine, laquelle force fait passer, dans la pile, l'électricité du pôle négatif au pôle positif qui se trouve ainsi à un potentiel supérieur à celui du pôle négatif. En continuant l'assimilation à un liquide, on voit que si en dehors de la pile l'électricité se rend du pôle + au pôle —, en dedans de l'élément elle se dirige au contraire du pôle — au pôle +.

Les premiers phénomènes relatifs aux effets des piles ont été étudiés d'abord par Galvani, puis par Volta ; de là les noms d'*électricité galvanique* ou *voltaïque* donnés souvent à la cause des effets produits par les courants électriques.

99. — Nous pouvons poursuivre dans ce nouvel ordre d'idées la comparaison que nous avons faite précédemment en la complétant un peu. Imaginons une machine élévatoire placée en un point quelconque et qui à travers un tuyau fasse passer un liquide d'un réservoir à un réservoir supérieur, ce qui correspond à une élévation du niveau, soit à une augmentation du potentiel. Réunissons les deux réservoirs par un tuyau constituant un circuit extérieur : l'eau, par suite même de la différence de niveau, s'écoulera du réservoir supérieur au réservoir inférieur. L'écoulement cesserait alors que les niveaux seraient à la même hauteur dans les deux réservoirs : mais, si l'action de la machine continue et maintient la différence de niveau, l'écoulement continuera aussi. D'autre part on voit que pour que l'effet puisse durer, il faut que, tandis que dans le tuyau extérieur l'eau s'écoule du réservoir supérieur au réservoir inférieur, l'eau marche, au contraire, dans la machine, du réservoir inférieur au réservoir supérieur, de telle sorte que chaque molécule du liquide décrira un cycle fermé complet.

100. — Les effets produits par un élément de pile sont faibles, mais

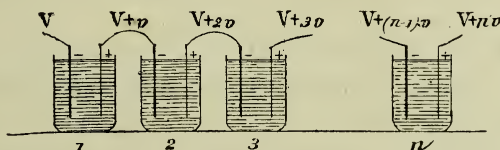


Fig. 65.

on peut, sans changer leur nature, augmenter leur intensité par des combinaisons de plusieurs éléments constituant alors une *pile*. Volta a énoncé les propriétés suivantes, sur lesquelles est basée la construction d'une pile quelconque et dont il est facile de comprendre que l'on puisse donner la démonstration expérimentale :

1° Par le fait même de sa composition, un élément de pile *produit* et *maintient* entre les deux électrodes une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des corps en contact;

2° La différence de potentiel maintenue dans un élément de pile est indépendante de la valeur absolue du potentiel auquel on peut amener l'un quelconque de ses pôles.

Supposons maintenant que l'on place plusieurs éléments *orientés* de la même façon (fig. 65), c'est-à-dire ayant les pôles + par exemple tournés du même côté, et réunissons les éléments de telle sorte que le pôle + de l'un soit relié par un conducteur au pôle — de l'autre, et qu'il reste libre aux deux extrémités de cet assemblage d'une

part un pôle + et de l'autre un pôle — qui seront les *pôles de la pile.*

Soit V la valeur, positive ou négative, du potentiel auquel nous maintenons le pôle zinc (par exemple, en le mettant en contact avec un conducteur infini qui soit à ce potentiel), et soit v la différence de potentiel que peut produire et maintenir chaque élément de pile. Il résulte des propriétés indiquées plus haut et du fait que deux conducteurs métalliques en communication métallique entre lesquels n'est pas interposée une source de force électromotrice prennent le même potentiel (61), que les valeurs du potentiel sur les différents pôles seront respectivement :

N° de l'élément	1er	2e	3e	$n^e - 1$	n^e
Pôle —	V	$V + v$	$V + 2v$	$V + (n - 2)v$	$V + (n - 1)v$
Pôle +	$V + v$	$V + 2v$	$V + 3v$	$V + (n - 1)v$	$V + nv$

La différence de potentiel entre les deux pôles de la pile, soit entre le n^{me} pôle + et le 1er pôle —, est $(V + nv) - V = nv$, c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle au nombre des éléments dont se compose la pile, ce qui permet, par suite, d'augmenter sa valeur autant qu'on le veut.

Il est intéressant d'étudier ce qui se passe dans le cas où la pile est isolée, c'est-à-dire lorsque aucun des deux pôles n'est maintenu à un potentiel déterminé.

Il est alors évident, par raison de symétrie, que dans une pile composée d'éléments égaux (et c'est le seul cas que l'on rencontre dans la pratique) les deux pôles doivent posséder des états électriques caractérisés par des potentiels égaux et de signes contraires.

101. — Les différentes propriétés que nous venons d'indiquer peuvent être vérifiées à l'aide de l'électromètre de Thomson (63) qui permet de mesurer le potentiel aux pôles et en divers points. Il importe de remarquer ici que, bien que dans la pile il existe entre les pôles une série non interrompue de conducteurs, le potentiel n'a pas partout la même valeur et varie d'un élément à l'autre : cela tient précisément à ce qu'il y a dans chaque élément une cause spéciale qui produit et maintient une différence de potentiel. Sans vouloir entrer ici dans la discussion complète de la question, nous dirons que Volta plaçait le siège de cette action particulière, de cette force électromotrice, au contact des métaux hétérogènes; depuis on avait admis que le siège de cette force est au contact du liquide et du métal attaqué par le liquide et que la force résultait de l'action chimique exercée, rejetant absolument l'idée que le

contact serait suffisant. Mais aujourd'hui, mieux renseigné, on sait que le contact de deux métaux hétérogènes peut produire une différence de potentiel, et même la maintenir si par instant on vient à la faire disparaître, mais que le contact seul ne peut donner un courant si les corps hétérogènes en contact sont réunis par un conducteur par lequel *constamment* tendrait à se rétablir l'équilibre, c'est-à-dire dans lequel passerait un courant : il faut alors une action autre, action qui corresponde à une dépense d'énergie.

Nous exposerons ultérieurement les faits et les raisonnements qui ont conduit à cette dernière conséquence.

102. — Malgré les comparaisons que nous avons faites, et ainsi que nous l'avons déjà indiqué, nous ignorons au juste quelle est la nature du courant électrique. Si nous cherchions à le caractériser d'après les conditions de sa production et d'après les effets auxquels il donne lieu, nous dirions que c'est un *transmetteur d'énergie*. Il prend naissance en un point où une certaine quantité d'énergie semble disparaître, et disparaît en effet sous la forme qu'elle possédait, travail mécanique, chaleur ou action chimique, pour reparaître indifféremment sous l'une de ces formes en un autre point quelconque du circuit, et cela d'une manière extrêmement rapide. Il importe de remarquer qu'il ne faudrait pas dire que l'énergie disparue est transformée en électricité, car celle-ci n'est pas modifiée dans sa quantité, pas plus que l'électricité n'est détruite lorsqu'elle reproduit l'énergie. Mais l'électricité a acquis une propriété qu'elle ne possédait pas : il apparaît d'une part une différence de potentiel qui détermine le courant; et d'autre part, c'est le retour à l'équilibre électrique, la disparition de la différence de potentiel qui coïncide avec l'apparition de l'énergie.

La comparaison que nous avons déjà faite avec un courant liquide qui circulerait dans un tube est encore applicable ici. Pour produire un courant de liquide dans une série de conduites, on dépense de l'énergie, non pour créer le liquide qui n'est pas changé en quantité, mais pour établir une différence de niveau; et lorsque l'énergie est créée en un point, ce n'est pas le liquide qui est modifié en quantité, mais c'est la différence de niveau qui disparaît et l'équilibre qui se rétablit.

Jusqu'à ces dernières années l'électricité avait été employée seulement en raison de la rapidité de sa transmission, du moins d'une manière générale, dans la plupart des applications. Maintenant, et ce n'est pas là un des côtés les moins intéressants de l'industrie électrique à l'époque actuelle, on cherche à utiliser le courant réellement,

comme pouvant transmettre l'énergie, sous la forme chimique, calorifique ou mécanique.

103. — Les actions produites par le passage des courants électriques sont de divers ordres et l'on peut les classer ainsi qu'il suit :

Actions physiologiques ;

Actions calorifiques et lumineuses produites dans le circuit ;

Actions chimiques produites dans le circuit extérieur ;

Actions mécaniques produites extérieurement, lesquelles se divisent en actions sur d'autres courants, actions sur des aimants, actions sur le fer doux et l'acier, etc.

D'autre part, nous aurons à rechercher quelles sont les causes qui donnent naissance à la force électromotrice, et nous reconnaîtrons qu'elles peuvent également se rapporter :

A des actions physiologiques ;

A des actions thermiques ;

A des actions chimiques ;

A des actions mécaniques de courants ou d'aimants placés extérieurement au circuit.

En réalité les diveres actions ne sont pas absolument séparées et il faut admettre, lorque l'on étudie une action, que l'on connaît au moins sommairement les lois qui régissent les autres actions. Ajoutons qu'il y a un réel intérêt à étudier à la fois une action déterminée produite par un courant et le courant produit par cette action.

Quel que puisse être, théoriquement, l'avantage qu'il y aurait, à notre avis, à étudier les courants dans l'ordre que nous venons d'indiquer et qui nous semble le plus rationnel, pour donner l'explication de termes universellement adoptés et qu'il convient nécessairement d'adopter, nous devons indiquer un procédé empirique de mesure des courants, comme nous avons fait pour la pile : il faudra d'ailleurs rechercher ultérieurement quelles sont les relations qui existent entre ces données à priori et les indications rationnelles qui seront fournies d'autre part.

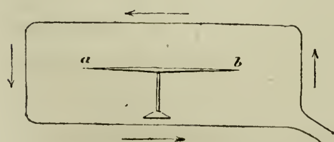


Fig. 66.

104. Galvanomètre. — Intensité galvanométrique d'un courant. — Considérons un cadre (fig. 66) sur lequel est enroulé une ou plusieurs fois un fil de cuivre recouvert de soie et dans lequel on place une aiguille aimantée ab posée sur un pivot ; supposons que le cadre soit placé dans le plan du méridien magné-

tique, de telle sorte que l'aiguille aimantée soit parallèle au fil. Si l'on vient à mettre les pôles d'une pile en communication avec les extrémités du fil, on verra (expérience d'Œrsted) l'aiguille se dévier et après quelques oscillations se fixer dans une position faisant un certain angle avec sa position initiale. On reconnaît que si, toutes choses égales d'ailleurs, on change l'ordre des communications de manière que le courant traverse le cadre dans un sens inverse, l'aiguille se déviera symétriquement par rapport au méridien magnétique. Dans tous les cas, le sens de la déviation peut être prévu par l'application de la règle d'Ampère : il imagine un observateur couché dans le courant de telle sorte que le courant entre par les pieds et sorte par la tête (ayant ainsi les Pieds du côté du pôle Positif et le Nez du côté du pôle Négatif) et placé de manière à toujours regarder l'aiguille : la droite et la gauche de cet observateur sont dites la droite et la gauche du courant. Ampère a reconnu que dans tous les cas, le pôle nord de l'aiguille est dévié à gauche du courant.

Dans une certaine mesure au moins, la déviation observée croîtra avec le nombre de tours du fil. L'appareil ainsi construit constitue un *multiplicateur :* c'est la forme simplifiée du *galvanomètre*.

On peut comprendre aisément, d'après ce que nous avons dit, que cet appareil peut nous renseigner sur l'existence d'un courant et sur son sens.

On reconnaît par des observations sommaires que, d'une manière générale, la déviation de l'aiguille croît avec l'intensité des divers effets que peut produire le courant.

105. — Il y a donc une relation entre la déviation de l'aiguille du galvanomètre et ce que l'on est naturellement conduit à appeler l'intensité du courant, intensité qui est manifestée par la grandeur des divers effets observés. On peut même se servir de cet appareil pour effectuer des mesures, au moins comparatives, comme nous allons l'indiquer. Nous emploierons pour cela le galvanomètre différentiel (fig. 67) qui, dans ses éléments essentiels, est constitué par un cadre sur lequel est enroulé un fil $a\,a'$ recouvert d'une matière isolante, coton, soie, gutta-percha, etc., et faisant un certain nombre de tours ; un second fil $b\,b'$ identique si possible sera enroulé à côté et, pour plus d'identité, il est préférable de former à l'avance avec ces deux fils une torsade qui sera ensuite enroulée sur le cadre ; nous appellerons A et B les deux fils, a a', b et b' respective-

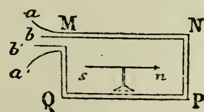


Fig. 67.

ment leurs extrémités. Au milieu du cadre est suspendue une aiguille aimantée *ns* ramenée à l'horizontalité (24), soit qu'elle repose sur un pivot, soit qu'elle soit soutenue par un fil de cocon sans torsion pour lui donner plus de mobilité; cette aiguille se meut sur un cercle gradué dont la ligne 0-180 est parallèle au cadre. L'appareil ainsi construit peut être considéré comme représentant, réduit à sa plus simple expression, un *galvanomètre différentiel* dont nous donnerons plus loin la description détaillée.

Nous supposerons que, à l'avance, on ait placé le cadre dans la direction du méridien magnétique, de telle sorte que ce cadre se trouve parallèle à la direction que prend spontanément l'aiguille aimantée qui se trouve ainsi sur la ligne 0-180. Si l'on vient alors à mettre en communication avec les pôles d'une pile les extrémités de l'un des fils, soit a et a' ou b et b', l'aiguille sera déviée conformément à la règle que nous avons donnée ci-dessus.

Voici maintenant quelles sont les idées sur lesquelles on s'appuie pour mesurer les courants à l'aide de cet appareil; nous nous occuperons seulement d'abord des mesures relatives, et nous passerons plus tard aux mesures absolues.

Faisons passer dans le fil A, par exemple, un courant quelconque et soit φ la déviation correspondante : il convient que cette déviation ne soit pas trop forte; nous nous assurerons que le courant est sensiblement constant en vérifiant que l'angle de déviation ne varie pas pendant un certain temps (nous dirons plus tard quelle pile il est bon d'employer pour atteindre ce résultat). Supprimons ce courant et, à l'aide d'une autre pile dont nous pourrons régler l'action, faisons passer un second courant dans le fil B et dans le même sens : avec des tâtonnements nous pourrons obtenir une déviation égale à φ; si les deux fils sont identiques de tout point, nous devons dire naturellement que ces deux courants sont d'égale intensité. Nous pouvons d'ailleurs vérifier l'identité des fils : 1° en faisant passer le premier courant dans le fil B ou le second courant dans le fil A et vérifiant que, dans l'un et l'autre cas, la déviation est toujours égale à φ; 2° en faisant passer simultanément les deux courants en sens inverse dans les deux fils, par exemple le premier de a vers a' et le second de b' vers b : il est clair que, s'il y a identité, les effets devront s'annuler et que l'aiguille restera dans le méridien magnétique. Supposons que cette vérification ait réussi.

On fait passer alors les deux courants simultanément chacun dans un des fils et dans le même sens : il se produit une dévia-

tion φ_2. Si l'on admet, ce qui paraît justifié par toutes les expériences ultérieures, que dans ces circonstances les courants n'agissent pas l'un sur l'autre, l'action sur l'aiguille est double de ce qu'elle était précédemment. (La déviation de l'aiguille dépend de plusieurs éléments, et l'une des actions venant seule à doubler dans ce cas, il n'y a pas nécessairement de relation simple entre cette action et la valeur de la déviation). On supprime alors l'un des courants et l'on fait varier la pile qui produit l'autre courant jusqu'à ce que la déviation soit devenue de nouveau φ_2 : on dit alors que le courant qui à lui seul produit ainsi la même déviation que les deux courants primitifs agissant simultanément a une intensité double de l'intensité de chacun de ceux-ci.

On continue d'une manière analogue, c'est-à-dire que, faisant passer le courant double dans le fil A, on fait en même temps passer le courant simple dans le fil B. D'après l'hypothèse précédente, on aura une action triple de la première et l'on observera une déviation φ_3; puis, supprimant l'un des courants on fera varier la pile qui produit l'action jusqu'à reproduire la déviation φ_3 et l'on dira alors que ce courant a une intensité triple de l'intensité primitive. Et ainsi de suite, aussi loin qu'il est jugé nécessaire.

Il y a d'ailleurs des vérifications utiles à faire : par exemple, on devra avoir la déviation φ en faisant passer en sens inverse le courant triple et le courant double, ou bien le courant double et le courant simple; on devra observer l'angle φ_2 en faisant passer en sens inverse le courant triple et le courant simple, etc.

106. — L'expérience montre que les déviations obtenues $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, ne sont pas proportionnelles aux intensités des courants (si cependant on observe des déviations très limitées, cette proportionnalité pourra être admise approximativement, comme il arrive dans toute relation que l'on étudie dans un très petit intervalle); mais on pourra construire, soit une table, soit une courbe qui fera connaître avec une certaine exactitude les intensités correspondant à des déviations données, ou réciproquement.

Le galvanomètre ainsi gradué nous permettra de comparer, dans les limites où on l'a étudié, les intensités des courants qui le traversent.

Il importe de remarquer, comme il sera expliqué ci-après, que les piles qui ont donné dans le cas précédent des courants dont les intensités sont dans les rapports 1, 2, 3, ne produisent ces résultats que lorsqu'elles sont accouplées aux fils A et B, mais que ces rapports ne seraient pas conservés pour tout autre circuit interpolaire.

Les résultats numériques indiqués par la table ou la courbe jointe à un galvanomètre nous donneraient ce que nous appellerons les *intensités galvanométriques* des courants, ou mieux les rapports entre ces intensités. Nous dirons plus tard comment on arrive à la notion de valeur absolue des intensités.

107. Courants électriques produits par la décharge des corps électrisés. — Si l'on considère un condensateur chargé dont on réunisse les deux armatures par un fil conducteur; si on établit par un fil métallique une communication entre deux corps qui sont à des potentiels différents; si, seulement, on établit cette communication entre un corps électrisé et la terre, l'équilibre électrique se produit et il faut concevoir alors que de l'électricité en quantité déterminée passe d'un point à l'autre à travers le fil. Il doit donc y avoir dans ce fil, pendant un temps très court il est vrai, un *courant électrique*. On peut, en effet, le mettre en évidence dans quelques circonstances, mais non toujours sans difficulté, ce qui tient précisément à la rapidité de l'action qui prend fin à peine a-t-elle commencé, tandis que dans la pile l'action se continue parce que la différence de potentiel est constamment maintenue.

Cette courte durée de l'action n'est pas la seule cause de la difficulté qu'il y a de mettre en évidence l'existence d'un courant dans les conditions que nous venons d'indiquer; il faut y joindre la faible valeur de la quantité d'électricité dégagée par les sources statiques : Faraday a montré qu'en plongeant pendant 3/20 de seconde, dans de l'eau acidulée d'acide sulfurique, deux fils de $1^{mm},5$ de diamètre, l'un de zinc et l'autre de platine, jusqu'à une profondeur de 18^{mm} environ, on mettait en jeu une quantité d'électricité supérieure à celle qui était produite à la suite de 28 révolutions d'une grande machine à plateau.

Mais comme nous l'avons dit, la différence de potentiel est beaucoup plus faible dans la pile que dans une machine électrique : en continuant la comparaison que nous avons faite, on a dans le cas de la pile une grande quantité d'eau qui s'écoule ou qui est prête à s'écouler sous l'influence d'une faible différence de niveau; dans le cas de la machine, des condensateurs, on a une petite quantité de liquide qui se déplace sous l'influence d'une différence considérable de niveau. On conçoit aisément que les résultats doivent être différents, et que telles actions que l'on ne peut observer dans un cas puissent se produire dans l'autre.

108. État variable, état permanent d'un courant électrique. — Lorsque l'on considère l'écoulement d'un liquide dans un tuyau

établi entre deux réservoirs présentant une différence de niveau constante, il y a lieu de distinguer deux phases dans le phénomène : dans la première, qui constitue l'état variable, les diverses molécules en arrivant à un point donné de la conduite y prennent des vitesses croissant généralement avec le temps ; mais après quelques instants le régime permanent s'établit : il y a aux différents points des vitesses différentes qui dépendent de la forme de la conduite, mais les diverses molécules qui viennent successivement passer en un même point y possèdent toujours la même vitesse ; d'autre part, si l'on considère deux sections quelconques, les quantités de liquide qui les traversent dans un même temps sont égales. Lorsque l'on vient à intercepter la communication, l'écoulement ne cesse pas partout à la fois et il y a une seconde période d'état variable. On conçoit d'ailleurs aisément que si la quantité de liquide qui peut s'écouler est faible, l'état de régime permanent ne pourra se produire.

Comme il n'y a pas de phénomènes absolument instantanés, on doit penser qu'il se produit quelque chose d'analogue dans la production du courant électrique et qu'il doit y avoir à considérer un état de régime permanent précédé et suivi d'un état variable. On sait d'ailleurs que les choses se passent ainsi pour la propagation de la chaleur par conductibilité; mais tandis que dans ce cas la période d'état variable qui est relativement assez longue n'a pas été étudiée avec soin, il n'en est pas de même pour le courant électrique.

M. Guillemin en a déterminé les caractères généraux, malgré sa courte durée, durée qui, en général, dans les corps bons conducteurs, ne dépasse pas $0^s,020$. (Nous ne parlerons pas de la durée de propagation dans les corps mauvais ou médiocres conducteurs, bien que le phénomène ait été étudié par M. Gaugain.) Nous indiquerons en quelques mots le principe de la méthode.

Imaginons que nous divisions par la pensée la période d'état variable en un grand nombre de parties égales, 100 par exemple; on conçoit qu'il soit possible par un moyen mécanique d'établir un courant, puis de mettre dans le circuit le galvanomètre pendant 0,01 de la durée totale de l'état variable, en s'arrangeant pour que ce contact ait lieu au 1er, au 2e, au 3e, au 4e centième de cette période : nous aurions ainsi la valeur de l'intensité aux divers instants de l'état variable qui nous serait connu complètement. Seulement une action d'une aussi courte durée ne produirait sans doute pas d'effet appréciable sur l'aiguille du galvanomètre : pour obtenir un déplacement déterminé, on reproduit périodiquement cette même action, et assez

rapidement pour que chaque influence ne soit pas éteinte lorsque survient l'influence suivante. L'aiguille prendra alors une certaine déviation qui, toutes choses égales d'ailleurs, dépendra de l'intensité du courant pendant la période considérée.

Pour arriver à ce résultat, on emploie un cylindre AB (fig. 68) fait d'une matière isolante et tournant avec beaucoup de rapidité autour de son axe : à l'extrémité B se trouve une virole métallique C entourant complètement la surface cylindrique et sur laquelle s'appuie un ressort métallique R duquel part un fil qui aboutit à l'un des pôles de la pile P dont l'autre pôle est en communication avec la terre en T. Sur le cylindre et en contact avec cette virole est disposée une pièce métallique qui, développée, aurait la forme d'un triangle rectangle et sur laquelle frotte, pendant une durée variable,

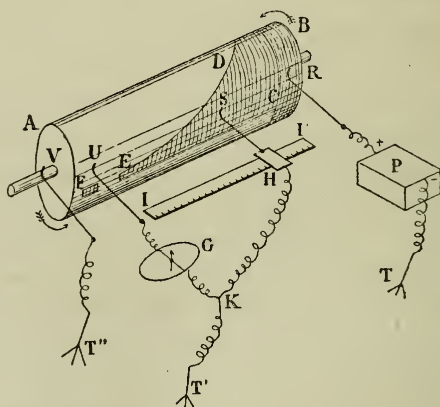


Fig. 68.

suivant la position qu'il occupe, un ressort S qui est en relation par l'intermédiaire du curseur H avec le fil HK sur lequel on veut opérer, fil qui d'autre part aboutit à la terre en T′. Le courant passera dans le fil HK lorsque le ressort S sera rencontré par la pièce métallique : il cessera lorsque le ressort s'appuiera sur la partie isolante.

D'autre part, on a disposé une pièce métallique rectangulaire F de faible largeur communiquant avec l'axe métallique du cylindre. Un ressort U frotte sur le cylindre et vient à chaque tour rencontrer F ; il est d'ailleurs relié au circuit principal en K par un fil sur le trajet duquel est placé un galvanomètre G, tandis qu'un frottoir V met constamment l'axe en communication avec la terre en T″. On a donc en KGUVT″ une dérivation qui est fermée à chaque tour, et pendant un temps qui reste toujours le même, au moment où V

passe sur F. Lors donc que le fil IIKT′ sera traversé par un courant, le galvanomètre subira à chaque tour une action très courte, mais très fréquemment renouvelée. Cette action se produit un certain temps après la fermeture du circuit principal, temps qui est déterminé par la distance qui sépare U de F au moment où le ressort S se met en contact avec le bord DE de la pièce métallique, et par conséquent aussi par la position de S relativement au cylindre ; cette position peut varier et elle est déterminée par la position du curseur H sur la règle II′.

On note les déviations indiquées au galvanomètre pour des positions diverses de S ; on reconnaît que ces déviations, et par conséquent les intensités du courant, croissent à mesure que S s'éloigne de E jusqu'à une certaine distance à partir de laquelle elles deviennent constantes. Cela veut dire que l'on est arrivé à examiner le courant à son état permanent.

On conçoit qu'à l'aide des chiffres représentant les déviations ob-

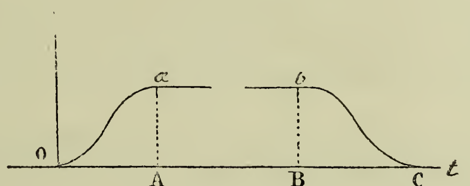


Fig. 69.

servées on puisse tracer une courbe 0*a* (fig. 69) représentant l'état variable du courant, courbe se raccordant à une droite *ab* qui caractérise l'état permanent.

On comprend que l'on puisse faire varier les conditions de l'expérience en changeant l'énergie de la pile, la longueur du circuit et le point de celui-ci où l'on a établi la dérivation du galvanomètre. Nous résumerons les principales conséquences auxquelles est parvenu M. Guillemin.

Le courant électrique, en chaque point d'un circuit où il s'établit, présente un état variable dont la durée dépend des trois conditions de l'expérience et qui pour un fil télégraphique de 570 ^{km} et une pile de Bunsen de 60 éléments, est de $0^s,02$ environ. Près de la pile, pendant cet état variable, les intensités sont décroissantes ; elles croissent, au contraire, dans la partie du circuit voisine de la terre : l'état permanent s'établit en même temps dans toute la longueur du circuit.

Des remarques analogues doivent être faites pour la décharge d'un fil au moment de la rupture du circuit. De plus, le temps de la décharge paraît être plus long que celui de la charge.

Les expériences que nous venons d'indiquer sont fort délicates, et l'appareil présente des pièces accessoires nécessaires pour un bon fonctionnement et non représentées sur la figure qui ne fait connaître que le principe de la méthode.

109. — L'établissement du régime permanent du courant dans un fil dépend des conditions où celui-ci se trouve placé, et peut durer beaucoup plus longtemps. C'est ce qui arrive, par exemple, pour les fils télégraphiques, sous-marins et souterrains : les fils métalliques sont recouverts d'une couche isolante et si à l'extérieur il se trouve un conducteur, l'eau de la mer, par exemple, ou une enveloppe métallique, une gaine de plomb, on a un véritable condensateur. Ce condensateur peut se charger par l'action de la pile comme le ferait une bouteille de Leyde ; seulement celle-ci en général acquiert immédiatement le maximum de charge, tandis que si le fil a une certaine longueur, il ne se chargera que d'une manière relativement lente, c'est-à-dire que l'état variable initial aura une durée assez grande : il en sera de même naturellement de l'état variable de rupture.

Cette prolongation de la durée de l'état variable joue un grand rôle dans la télégraphie sous-marine.

110. Vitesse de l'électricité. — Des recherches diverses ont été faites pour déterminer avec quelle vitesse l'électricité se propage dans les corps conducteurs. On peut concevoir à priori que, sous cette forme, la question est mal définie : s'agit-il de rechercher à quelle distance dans un fil donné se propage l'action électrique pendant l'unité de temps? ou bien se propose-t-on de rechercher à quelle distance pendant l'unité de temps est atteint l'état permanent? ce sont en réalité deux questions distinctes. Dans la plupart des recherches qui ont été faites, on s'est borné à déterminer après combien de temps un phénomène donné se produisait à l'extrémité d'un fil de longueur connue, sans que l'on pût affirmer que la production de ce phénomène correspondît soit à la première manifestation électrique, soit à l'établissement de l'état permanent. Dans les recherches faites sur l'électricité statique, le phénomène étudié était la production d'une étincelle électrique; pour l'électricité dynamique c'était la déviation du galvanomètre.

Wheatstone, le premier, a donné des résultats présentant quelque précision : il étudiait le flux d'électricité qui circulait dans un fil

réunissant deux corps électrisés à des potentiels différents entre lesquels l'équilibre électrique se rétablissait. Les deux armatures d'un condensateur A et B (fig. 70) peuvent être mises en communication avec un circuit de 800 mètres de long environ, présentant trois solutions de continuité en C, D et E qui ont été disposées à côté l'une de l'autre; A étant en contact continu avec le fil, au moment où l'on approchera l'autre extrémité du fil F de l'armature B, l'équilibre se rétablira et trois étincelles jailliront en C, D et E. On ne peut directement observer aucune différence entre les instants auxquels elles se produisent; mais, par l'emploi du miroir tournant, Wheatstone put mettre cette différence en évidence. Au lieu de regarder directement les étincelles, on regarde les images qu'elles donnent dans un miroir faisant 6 à 800 tours par seconde. Si les étincelles ne duraient qu'un instant infiniment petit, chacune donnerait une image réduite à un point; en réalité on voit trois traits, ce qui prouve que le phénomène a duré pendant un certain temps correspondant à une rotation déterminée du miroir, rotation que l'on peut évaluer d'après la longueur des traits (Wheatstone a trouvé que, dans ses expériences, cette durée était de $\frac{1}{24\,000}$ de seconde). D'autre part, si les trois étincelles commençaient et finissaient en même temps, les trois traits auraient leurs extrémités sur une même droite : comme l'expérience montre que, au contraire, le trait correspondant à l'étincelle du milieu est un peu en retard, il faut conclure que cette étincelle s'est produite un peu après les autres, et le retard peut être évalué par la distance des extrémités si l'on connaît la vitesse de rotation. La différence de temps fut évaluée à $\frac{1}{1152\,000}$ de seconde pour une distance de 400 mètres, ce qui donne 463 000 kilomètres en une seconde. Tel est le principe de la méthode, sur laquelle nous ne donnerons pas d'autres détails.

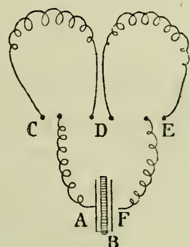


Fig. 70.

111. — MM. Fizeau et Gounelle ont étudié la vitesse de propagation d'un courant à travers un fil conducteur à l'aide d'une méthode dont le principe est simple et rappelle celui que M. Fizeau a appliqué à la détermination de la vitesse de la lumière.

Une roue que l'on peut faire tourner avec une rapidité plus ou moins grande présente sur sa circonférence des parties alternativement conductrices et isolantes (fig. 71) : en B et C se trouvent deux ressorts faisant frottoirs, dont l'un B communique à

la pile en A et dont l'autre C est le point de départ d'un fil CEFD dans lequel on étudie la vitesse de propagation (dans les expériences dont il s'agit, le fil était un fil de ligne télégraphique de 314 kilomètres de longueur), et qui à l'autre extrémité D se bifurque : l'une des parties D T″ se rend directement à la terre, l'autre aboutit en K à un ressort frottant sur la jante de la roue et à côté duquel se trouve un second frottoir H d'où part un fil qui, traversant le galvanomètre G, se rend également à la terre en T′.

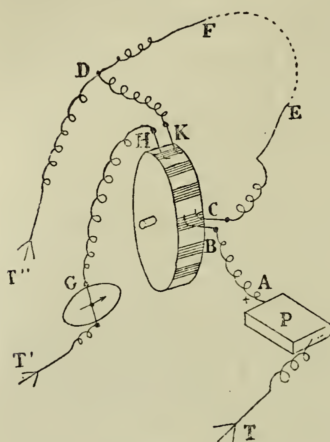


Fig. 71.

Supposons la roue immobile et les ressorts appuyant les uns et les autres sur des parties métalliques; le courant ira sans interruption de A à B, C, E et D et là se divisera : une partie passera par D T″ et l'autre par D K H G T′ et, traversant le galvanomètre G, fera dévier l'aiguille.

Si la roue tourne lentement, les choses se passeront d'une manière analogue. Lorsque B et C appuieront sur une partie isolante, le courant ne passera pas; il sera lancé dans le circuit C E D seulement au moment où ces pièces rencontreront une partie métallique arrivera en D, puis en K, avant que cette pièce n'ait quitté le contact métallique et le résultat sera le même que précédemment; l'aiguille du galvanomètre sera déviée pendant tout le temps que ce contact subsistera pour retomber au zéro lorsqu'il aura cessé.

Mais si le mouvement de rotation s'accélère, il n'en sera plus ainsi : la propagation de l'électricité exigeant un temps fini pour aller de C en D, il arrivera un moment où, lorsque le courant arrivera en K, cette pièce appuiera sur une partie isolante qu'il ne pourra franchir : tout le flux d'électricité passera donc par D T et rien ne passera dans le galvanomètre dont l'aiguille restera dès lors immobile : elle ne sera pas déviée davantage lorsque les ressorts H, K passeront sur un contact métallique, car le courant qui pourrait alors passer par cette voie aurait dû partir un certain temps auparavant du point C, ce qui est impossible parce qu'alors le ressort correspondant passe sur une partie isolante. Connaissant la vitesse de rotation de la roue, sachant que en B C et H K les ressorts passent en même temps sur les pièces métalliques qu'ils abandonnent en

même temps, et sachant la largeur de ces pièces, on peut calculer le temps qui s'écoule entre le moment où BC ayant touché le métal le courant s'est établi et l'instant où HK ayant quitté le conducteur le courant n'a pu passer; comme on a d'autre part la longueur du fil, on peut calculer la vitesse en admettant que le mouvement est uniforme.

On comprend l'importance du fil DT″ par lequel dans tous les cas passe tout ou partie du courant : sans ce fil, en effet, le courant étant arrêté en K, le fil CEK resterait chargé et, au contact suivant, l'électricité s'écoulant en vertu de cette charge statique pour ainsi dire, l'aiguille serait déviée dans tous les cas.

Il importe de remarquer que l'on ne sait pas au juste ce que l'on mesure dans cette expérience : de ce que l'aiguille du galvanomètre n'est pas déviée, on peut conclure, ou que le courant ne passe pas du tout entre H et T′, ou que seulement il est arrivé à une période de l'état variable à laquelle correspond une intensité qui est insuffisante pour mettre l'aiguille en mouvement. Le problème serait nettement déterminé si l'on obtenait le temps nécessaire pour que l'état permanent s'établît à une certaine distance. On conçoit que l'appareil de M. Guillemin décrit plus haut peut être utilisé dans ce but.

Quoi qu'il en soit, voici quelques chiffres qui ont été obtenus par divers procédés et dans des conditions différentes :

Wheatstone, — fil de cuivre........	460000 km par seconde.
Fizeau et Gounelle, — fil de fer.....	100000
Guillemin et Burnouf, — fil de cuivre.	180000

112. — Quelle relation existe-t-il, toutes choses égales d'ailleurs, entre l'intensité d'un courant électrique et la quantité d'électricité qui traverse le circuit dans un temps donné? On peut démontrer qu'il y a proportionnalité, par exemple à l'aide des expériences suivantes.

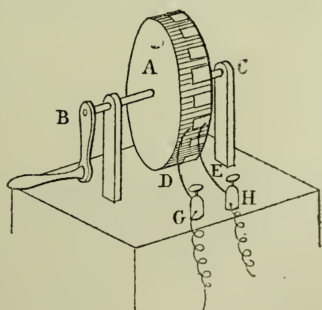


Fig. 72.

Dans un circuit comprenant une pile et un galvanomètre, intercalons une roue à interruption de Masson (fig. 72) : cet appareil se compose d'un disque isolant A, en verre par exemple, pouvant tourner autour d'un axe BC perpendiculaire à son plan. Sur la jante de cette roue se trouve une pièce métallique,

dentelée sur la moitié de sa largeur tandis qu'elle est continue sur l'autre; sur la partie dentelée on a conservé tel rapport que l'on a voulu entre les pleins et les vides, par exemple on a pris des pleins égaux aux vides. Deux ressorts, D, E faisant frottoirs appuient sur ce disque, l'un reposant sur la surface métallique continue, l'autre sur la partie discontinue : ces ressorts communiquent aux deux extrémités G, H du fil que doit traverser le courant. Tant que le ressort appuie sur une partie métallique, le circuit est fermé, le courant passe, l'aiguille du galvanomètre est déviée; si au contraire ce ressort repose sur une partie isolante, le circuit est ouvert, le courant est interrompu. Si l'on fait tourner la roue d'une manière continue et uniforme, on voit que pendant la moitié du temps le courant passera et qu'il sera interrompu pendant l'autre moitié : si la vitesse est assez considérable, malgré ces interruptions, l'aiguille restera déviée comme s'il y avait un courant continu, à cause du peu de durée pendant laquelle le courant cesse d'agir. On reconnaît que la déviation observée alors est telle qu'elle correspond sensiblement à une intensité galvanométrique qui serait la moitié de celle que l'on mesure lorsque le courant ne subit pas d'interruption. On trouve d'une manière générale, dans tous les cas, que l'intensité galvanométrique déduite de la déviation de l'aiguille lors de la rotation est à la déviation lors du courant continu, sensiblement dans le rapport de la largeur d'une dent métallique à l'intervalle qui comprend une dent et un vide.

Le rapport devrait être exactement le même si à des temps égaux correspondaient absolument des mêmes quantités d'électricité passant dans l'appareil; mais il peut n'en être pas strictement ainsi par suite de l'existence de l'état variable.

113. — On peut éliminer cette influence ainsi qu'il suit : on inter-

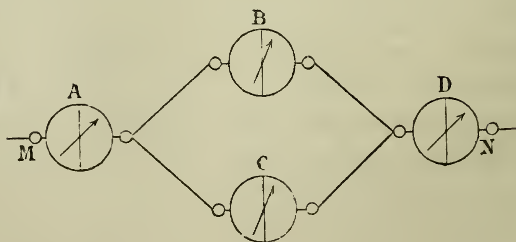


Fig. 73.

cale dans un circuit entre les points M et N (fig. 73) quatre galvanomètres identiques A, B, C et D disposés comme l'indique la figure.

Le courant passant en A se bifurque pour aller en B et C, et les deux courants se réunissent en D, de telle sorte que la quantité d'électricité qui passe en D est la même que celle qui traverse le galvanomètre A; si de plus les conducteurs intercalaires sont identiques, la quantité d'électricité qui passe en B est égale à celle qui passe en C, et chacune de celles-ci est la moitié de ce qui passe en A et en D.

On mesure les déviations qui se produisent en A, B, et C D, et l'on reconnaît que les déviations sont égales en A et D d'une part, et en B et C d'autre part ; et que de plus ces dernières sont telles, qu'elles correspondent à une intensité du courant moitié de celle qui est mesurée en A et D, ces intensités étant évaluées d'après le galvanomètre comme il a été dit ci-dessus (105).

Nous pouvons dès lors donner une définition de l'intensité absolue d'un courant, cette intensité étant évaluée en fonction des données précédemment déterminées.

Nous appellerons *intensité d'un courant* la quantité d'électricité qui passe en 1 seconde dans le conducteur considéré. Si donc I est cette intensité, et que, l'écoulement de l'électricité ayant atteint un régime permanent, il passe une quantité d'électricité Q dans un temps t, on a :

$$I = \frac{Q}{t} \cdot$$

Le galvanomètre, gradué comme nous l'avons indiqué, donne pour valeurs des intensités des nombres proportionnels à I.

114. — L'intensité d'un courant, dépendant de la quantité d'électricité, doit être la même en tous les points du circuit, puisque nous avons dit (108) que dans l'état permanent, le seul que nous étudions, toutes les sections sont traversées par la même quantité d'électricité dans le même temps. On démontre qu'il en est bien ainsi en plaçant successivement un galvanomètre en divers points du circuit et reconnaissant que la déviation est la même.

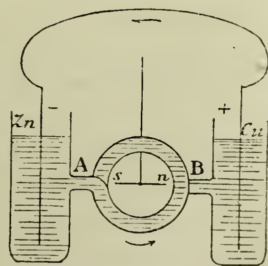


Fig. 74.

On a même démontré, mais sans faire de mesure comparative, que le courant traverse également le liquide de la pile, en plaçant les deux métaux dans deux vases différents réunis par un tube AB (fig. 74) contourné en cercle : une aiguille aimantée *ns* placée au centre de ce cercle est déviée quand le circuit est fermé par un fil interpolaire (Conrad W. Cooke).

115. — L'intensité du courant produit par une pile donnée dépend du circuit extérieur, et toute variation de nature, de longueur ou de section dans ce circuit, ou seulement dans une partie du circuit, amène une variation dans l'intensité du courant.

On reconnaît facilement l'influence de ces variations, par exemple par les expériences suivantes. Soit un circuit comprenant une pile et un galvanomètre, et dans lequel entre deux points A et B on peut enlever le fil conducteur pour en substituer un autre dont on fait changer successivement la longueur, ou la section ou la nature. On reconnaît que si l'on prend un plus long fil, l'intensité du courant diminue et qu'elle augmente pour un fil plus court; — une section plus grande produit un accroissement de l'intensité du courant, et *vice versa ;* — enfin deux fils de même longueur et de même section, mais de nature différente, donnent lieu à des courants d'intensités inégales.

116. — On ne voit pas immédiatement d'ailleurs, dans ces conditions, une relation simple entre les variations apportées au circuit

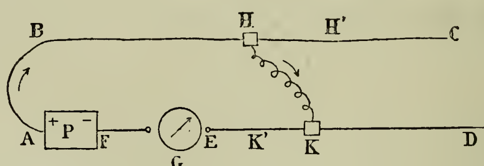


Fig. 75.

et celles que l'on observe dans les intensités; il importe d'étudier la question de plus près.

Pour cela recherchons, contrairement aux expériences précédentes, quelles relations doivent exister entre deux fils pour que, substitués l'un à l'autre, ils produisent les mêmes effets. Formons, par exemple, un circuit comprenant une pile P (fig. 75), un galvanomètre G, les deux fils que l'on veut comparer BC et DE, et complété par un conducteur quelconque terminé par deux curseurs H et K mobiles sur les fils. Le courant passant, l'aiguille du galvanomètre accusera une certaine déviation qui changera si, par exemple, on amène le curseur H en H'; mais en déplaçant en sens contraire de K en K' le second curseur, on ramènera l'aiguille à sa position primitive ; les deux parties HH' et KK' des deux fils ont donc produit le même effet : elles sont *équivalentes*.

Supposons qu'on essaie successivement deux fils de même nature et de section s et s'; on trouvera que pour qu'ils soient *équivalents*

au point de vue du passage du courant, c'est-à-dire pour que l'intensité de celui-ci ne change pas lorsque l'on substituera de l'un à l'autre, il faut que l'on ait :

$$\frac{l}{l} = \frac{s'}{s},$$

l et l' étant les longueurs.

Mais si l'on prend deux fils de même section mais de nature différente, on reconnaîtra que les longueurs devront être inégales et que, pour ces corps, on obtiendra l'équivalence si l'on a :

$$\frac{l_1}{l} = k_1,$$

k_1 étant un rapport constant pour les deux corps considérés.

On peut déterminer maintenant quelle doit être la relation entre les longueurs et les sections de deux fils de nature différente pour qu'ils soient équivalents : soient $l\ s$, $l_1 s_1$ les éléments de ces fils. Considérons d'abord un fil du second corps, de section s, et soit l' la longueur qui le rend équivalent au premier; on a :

$$\frac{l'}{l} = k_1.$$

Mais, comparant les deux fils $l' s$ et $l_1\ s_1$ de même nature, on doit avoir :

$$\frac{l_1}{l'} = \frac{s_1}{s}.$$

Multipliant ces deux équations terme à terme, on aura la condition de l'équivalence :

$$\frac{l_1}{l} = k_1 \frac{s_1}{s},$$

ou bien,

$$\frac{l}{s} = \frac{1}{k_1} \frac{l_1}{s_1};$$

le coefficient k_1 est appelé le *coefficient de conductibilité* relatif du second corps par rapport au premier.

On convient de prendre toujours un même corps comme terme de comparaison : si c'est le premier corps (celui dont les éléments sont ls), la valeur de k_1 sera désignée absolument sous le nom de conductibilité du premier corps. On peut chercher la longueur λ_1 de ce fil type de section égale à 1 qui serait équivalente à un fil donné l_1, s_1, k_1 ; cette longueur est donnée par l'équation

$$\frac{l_1}{k_1 s_1} = \frac{\lambda_1}{1},$$

cette longueur λ_1 est ce qu'on appelle la *longueur réduite* ou *résistance* du fil considéré [1].

117. Lois de Ohm. — Nous avons fait remarquer qu'il y a une certaine analogie entre la transmission de la chaleur dans un corps conducteur et le passage de l'électricité dans un fil métallique. Ohm, en développant cette comparaison, est arrivé à des résultats importants constituant des lois qui portent son nom et qui ont été étudiées expérimentalement, notamment par Pouillet, et vérifiées.

Dans l'un et l'autre cas, il faut considérer seulement l'état permanent caractérisé par cela que, dans l'unité de temps, chaque section transmet autant de chaleur qu'elle en reçoit, toutes les sections donnant ainsi passage à la même quantité de chaleur (ou d'électricité). Il faut d'ailleurs comparer les phénomènes qui se passent à travers un fil, pour l'électricité, à ceux qui se produisent, pour la chaleur, dans un mur de largeur indéfinie et non dans un fil, à cause de la perte de chaleur que celui-ci éprouve par sa surface latérale et qui ne se présente pas pour l'électricité dans les conditions ordinaires des expériences.

En résumant les lois pour la chaleur, on sait que si T_0 et T représentent les températures maintenues invariables des sections extrêmes séparées par un intervalle d, t la température d'un point situé à une distance x de la première face et k un coefficient constant, on a :

$$t = T_0 - \frac{T_0 - T}{d}\, x,$$

d'où l'on tire :

$$T_0 - t = \frac{T_0 - T}{d}\, x.$$

C'est-à-dire que les variations de température sont proportionnelles aux distances.

Si nous appliquons cette formule immédiatement à l'électricité, en

1. On se sert quelquefois aussi de la *section réduite* d'un conducteur : c'est la section ω_1 d'un fil type de longueur 1 ; cette valeur est déterminée par l'équation

$$\frac{l_1}{k_1 s_1} = \frac{1}{\omega_1}.$$

D'où,

$$\omega_1 = \frac{k_1 s_1}{l_1}.$$

On voit que l'on a toujours :

$$\lambda_1 \omega_1 = 1.$$

remplaçant seulement les températures par les potentiels, on a :

$$V_0 - v = \frac{V_0 - V}{l} x,$$

V_0, V, v étant des potentiels et l la longueur du fil.

Si donc on a un fil dont les deux extrémités sont maintenues à des potentiels V_0 et V, la variation de potentiel en passant d'une extrémité à un point intermédiaire est proportionnelle à la différence de potentiel des points extrêmes, à la distance du point considéré à l'extrémité et en raison inverse de la distance des deux extrémités.

Kohlrausch, entre autres, a vérifié expérimentalement ces lois.

D'autre part, la quantité de chaleur Q qui, dans l'unité de temps, passe à travers l'unité de surface du mur indéfini considéré, est :

$$Q = k \frac{T_0 - T}{d}.$$

Donc la quantité d'électricité qui, par analogie, passera à travers le fil considéré dont s est la section sera :

$$Q = ks \frac{V_0 - V}{l} = \frac{V_0 - V}{\lambda},$$

λ étant la longueur réduite du fil qui est égale à $\frac{l}{ks}$.

Par suite, en vertu de la proportionnalité démontrée entre l'intensité et la quantité, on voit que l'intensité du courant dans un fil homogène est proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux extrémités du fil et à la section de celui-ci, inversement proportionnelle à la longueur, et dépend d'un coefficient variant avec la nature du corps considéré.

118. — Si dans le cas de la chaleur on plaçait à la suite deux murs de nature différente dont les faces extrêmes seraient maintenues à des températures invariables, la variation de température dans chaque mur serait encore proportionnelle à la distance, mais le rapport de l'une à l'autre ne serait pas le même par suite de la différence de conductibilité.

Une remarque analogue serait à faire pour l'électricité, mais il nous sera possible d'arriver à un résultat simple en nous appuyant sur les remarques et définitions données plus haut (116).

Supposons en effet que, entre deux points dont on maintient le potentiel aux valeurs respectives V_0 et V, on place à la suite différents conducteurs définis par les éléments indiqués plus haut : k_1 l_1 s_1, k_2 l_2 s_2... ; nous savons que chacun d'eux pourra être remplacé par une longueur convenable d'un fil type de section 1 ; soient λ_1, λ_2,...

les diverses longueurs réduites. Tout doit donc se passer entre les extrémités du conducteur complexe comme entre celles de ce fil type si celui-ci avait une longueur $\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots$. On aura alors pour calculer la quantité d'électricité qui passera en une seconde :

$$Q = \frac{V_0 - V}{\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots},$$

si l'on a pris convenablement les unités.

On voit que la quantité d'électricité qui passe dans chaque section et, par suite aussi, l'intensité du courant sont proportionnelles à la différence de potentiel entre les deux points considérés, et en raison inverse de la résistance totale des fils, somme des résistances de chacune des parties qui composent le conducteur.

119. — Dans un élément de pile tel que nous l'avons décrit, la différence de potentiel se manifeste à la surface de contact du zinc et de l'eau acidulée : tandis que dans tous les autres points du circuit il y a variation continuelle et progressive du potentiel qui décroît, plus ou moins rapidement, suivant la nature du conducteur considéré, du pôle + au pôle —, il y a un relèvement brusque de cette quantité au contact de ces deux substances. Nous pouvons donc considérer le flux d'électricité comme partant des premières molécules d'eau acidulée, traversant l'élément de pile, puis successivement les diverses parties du circuit interpolaire pour venir se terminer au zinc. Si donc nous désignons par E, force électromotrice de la pile, une quantité proportionnelle à la différence de potentiel que peut produire et maintenir cet élément, par π la résistance ou longueur réduite de la pile, par Λ la résistance totale du circuit interpolaire, on peut écrire, I désignant l'intensité du courant :

$$I = \frac{E}{\pi + \Lambda}.$$

On a, bien entendu :

$$\Lambda = \Sigma\lambda = \Sigma\,\frac{l}{ks},$$

cette somme s'étendant à *toutes* les parties qui constituent le circuit

On écrit aussi souvent cette formule :

$$I = \frac{E}{R},$$

dans laquelle R représente la résistance *totale* du circuit.

120. — Si l'on a plusieurs éléments de pile (fig. 76) placés à la suite,

les différences de potentiel s'ajoutent, comme on peut facilement le reconnaître par un raisonnement analogue à celui que nous avons fait dans le cas où les éléments sont égaux (99), d'une part; et,

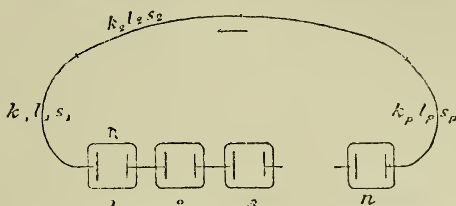


Fig. 76.

d'autre part, le courant a à traverser l'ensemble de tous les éléments. On aura alors la formule :

$$I = \frac{\Sigma E}{\Sigma \pi + \Lambda},$$

le signe Σ s'appliquant à tous les éléments.

On conçoit que s'il y avait un ou plusieurs éléments placés en sens contraire des autres, ils agiraient pour diminuer la différence de potentiel : on peut cependant même dans ce cas conserver ΣE en convenant seulement qu'il s'agit d'une somme algébrique, les éléments placés en sens contraire des autres étant considérés comme ayant une force électromotrice négative. Quant aux divers termes de $\Sigma\pi$ ils sont tous essentiellement positifs, la résistance d'un conducteur ou d'un élément étant la même quel que soit le sens dans lequel il est traversé par un courant.

Dans les cas où les éléments sont tous égaux, on a, si leur nombre est n :

$$I_n = \frac{n E}{n \pi + \Lambda}.$$

On ne peut prévoir immédiatement quel sera l'effet qui résultera de l'association d'un certain nombre d'éléments, car on augmente à la fois la force électromotrice et la résistance. Une discussion de la formule dans chaque cas particulier peut seule renseigner exactement à ce point de vue [1].

1. La valeur précédente peut s'écrire :

$$I_n = \frac{n E}{\pi \left(n + \frac{\Lambda}{\pi} \right)},$$

et l'on voit que si Λ est petit par rapport à π, l'influence du circuit est peu con-

On reconnaît alors que lorsque le circuit extérieur a une faible résistance par rapport à la pile, il n'y a pas intérêt à augmenter le nombre des éléments : au contraire, l'intensité du courant augmente rapidement avec le nombre des éléments, si la résistance du circuit n'est pas petite par rapport à la résistance de la pile ; il y aurait même proportionnalité si la résistance de la pile était nulle.

Ces résultats sont d'ailleurs conformes à ce que l'on obtient lorsque l'on effectue des mesures dans diverses conditions.

121. — Dans le cas où, entre les deux pôles d'une pile, on a établi plusieurs fils conducteurs différents, ceux-ci seront les uns et les autres traversés par des courants ; l'intensité totale pourra être calculée comme il a été expliqué précédemment en évaluant la résistance de la partie interpolaire du circuit. Quant à l'intensité dans un fil déterminé, on peut la calculer par une formule qui s'appuie sur ce que l'on admet que, dans ces dérivations, l'électricité se partage proportionnellement aux sections réduites des fils [1].

On arrive également à résoudre les questions de ce genre, par exemple en s'appuyant sur la règle de Kirchhoff : si l'on convient de représenter les intensités des courants (ou les quantités d'électricité correspondantes) par des nombres affectés du signe + ou du signe — suivant que, en un point, le courant s'approche ou s'éloigne, en chaque point, la somme algébrique de ces intensités est nulle.

Cette règle est évidente si l'on admet que le courant produit par le passage de l'électricité est analogue au passage d'un liquide dans un tuyau : elle est d'ailleurs vérifiée par l'expérience.

sidérable ; si l'on passait au cas extrême où $\Lambda = 0$, on aurait alors simplement :

$$I_n = \frac{E}{\pi};$$

l'intensité du courant serait la même que s'il n'y avait qu'un élément :

La même formule peut s'écrire :

$$I_n = \frac{n\,E}{\Lambda\left(1 + n\,\frac{\pi}{\Lambda}\right)},$$

et l'on voit que si π est petit par rapport à Λ l'influence de la résistance de la pile est peu considérable, sans que l'augmentation de force électromotrice cesse de produire son effet : si, à la limite, on avait $\pi = 0$, il viendrait :

$$I_n = \frac{n\,E}{\Lambda},$$

et l'intensité serait proportionnelle au nombre des couples.

1. Soit une pile maintenant une différence de potentiel $V_0 — V$ dont π est la résis-

122. — Les résultats auxquels on est conduit sont intéressants surtout en ce qu'ils permettent de prévoir ce qui doit arriver dans le cas d'éléments *montés en batterie* (fig. 77), c'est-à-dire disposés de telle façon que tous les cuivres soient réunis ensemble d'une part et tous les zincs d'autre part, le fil interpolaire établissant une communication entre le pôle — unique et le pôle + unique ainsi obtenus.

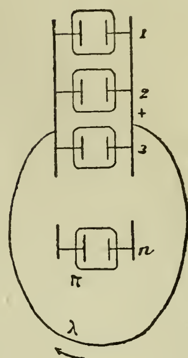


Fig. 77.

On voit que si l'on considère en particulier un élément de pile, il envoie de l'électricité à la fois dans le fil interpolaire et dans chacun des autres éléments, de telle sorte que l'effet qu'il produit dans le circuit interpolaire peut être donné par la formule de la note précédente. Chacun des éléments agit d'une façon analogue : il passe donc dans le fil inter-

tance et soient (fig. 78) des fils $k_1\ l_1\ s_1 \ldots k_p\ l_p\ s_p$ réunissant ses pôles ; les ω étant

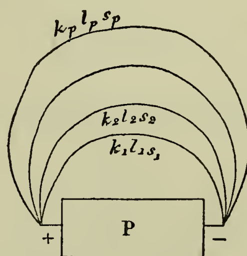


Fig. 78.

des sections réduites et les q les quantités d'électricité qui passent dans chaque fil, on a, d'après l'hypothèse :

$$\frac{q_1}{\omega_1} = \frac{q_2}{\omega_2} \ldots\ldots = \frac{q_p}{\omega_p}.$$

Si Q est la quantité totale d'électricité qui prend naissance dans le temps considéré, on a :

$$Q = \Sigma\, q,$$

et par suite pour le fil de rang n :

$$q_n = \frac{Q\,\omega_n}{\Sigma\,\omega}.$$

Mais, d'autre part, les fils constituant la dérivation pourraient être remplacés par un fil type de longueur 1 et de section $\Sigma\omega$; ou, ce qui reviendrait au même, par un fil type de section 1 et de longueur réduite $\frac{1}{\Sigma\omega}$; on aura donc (119) :

polaire une quantité d'électricité qui est la somme des quantités ainsi calculées, ce qui donne l'intensité du courant observable; la question prend une forme simple dans le cas le plus fréquent où les éléments sont tous égaux[1].

123. — On peut facilement prévoir, même sans calcul, l'effet que doit produire cet accouplement, comparé à l'effet que donnerait un seul élément dont les pôles seraient réunis par le même fil interpolaire. On comprend, en effet, aisément que tout se passe comme si l'on avait un seul élément de plus grande surface et par suite de moindre résistance, la force électromotrice n'étant pas changée (nous dirons plus tard qu'elle ne dépend pas de la surface) et que, par suite, l'intensité du courant doit être augmentée dans une certaine mesure. Cette augmentation dépend des conditions de l'expérience et, si le circuit interpolaire est très résistant, elle peut être assez faible pour qu'il n'y ait pas pratiquement d'intérêt à accroître le

$$Q = \frac{V_0 - V}{\pi + \frac{1}{\Sigma\omega}},$$

et par suite :

$$q_n = \frac{(V_0 - V)\,\omega_n}{\pi\Sigma\omega + 1}.$$

Si des quantités on passe aux intensités, on aura :

$$I_n = \frac{E\,\omega_n}{\pi\Sigma\omega + 1}.$$

1. Soient E la force électromotrice d'un élément, π sa résistance, et par suite $\frac{1}{\pi}$ sa section réduite, n leur nombre, J_n l'intensité dans le circuit interpolaire dont la section et la longueur réduites sont ω et λ : l'un des éléments agissant comme électromoteur envoie un courant dans les $n - 1$ autres éléments et dans le circuit interpolaire; le courant produit dans ce dernier a pour valeur :

$$\frac{E\,\omega}{\pi\left(\omega + (n-1)\frac{1}{\pi}\right) + 1},$$

et comme il en est de même des autres éléments, l'intensité totale dans le conducteur interpolaire sera la somme de toute ces intensités partielles, soit :

$$J_n = \frac{n\,E\,\omega}{\pi\left(\omega + (n-1)\frac{1}{\pi}\right) + 1} = \frac{n\,E}{\pi + (n-1)\frac{1}{\omega} + \frac{1}{\omega}},$$

et à cause de $\omega\lambda = 1$,

$$J_n = \frac{n\,E}{\pi + n\,\lambda}.$$

nombre des éléments employés[1]; au contraire l'intensité augmente notablement avec le nombre des éléments si le circuit interpolaire est peu résistant.

124. Mesure des forces électro-motrices. — De la relation :

$$C = \frac{\Sigma E}{\Sigma \pi + \Lambda},$$

le dénominateur n'étant ni nul, ni infini, on déduit que C et ΣE seront nuls en même temps. Si donc, dans un circuit comprenant plusieurs éléments de pile et un galvanomètre, celui-ci n'indique le passage d'aucun courant, c'est que ΣE est nul; que, par suite, il y a plusieurs éléments dont les uns sont dirigés en sens contraire des autres, et que la somme des forces électromotrices de ceux qui sont dirigés dans un sens est égale à la somme des forces électromotrices de ceux qui sont dirigés en sens contraire, ou en *opposition*.

Cette remarque a été appliquée à la comparaison des forces électromotrices de divers éléments. Imaginons que l'on ait une pile AB (fig. 79) composée d'un grand nombre d'éléments de faible force électromotrice (pile thermo-électrique) dont on puisse introduire un

1. La discussion de la formule conduit à quelques résultats importants parmi lesquels nous signalerons les suivants.

La valeur de J_n peut s'écrire :

$$J_n = \frac{nE}{\pi\left(1 + n\frac{\lambda}{\pi}\right)},$$

et l'on voit que si λ est petit par rapport à π, l'influence du circuit sera peu considérable : si l'on admettait le cas extrême $\lambda = 0$, on aurait :

$$J_n = n\frac{E}{\pi},$$

valeur limite qui ne peut jamais être atteinte et qui montre que l'intensité du courant serait alors proportionnelle au nombre des couples.

La même formule peut s'écrire :

$$J_n = \frac{n\,E}{\lambda\left(\frac{\pi}{\lambda} + n\right)},$$

et l'on voit que si π est petit par rapport à λ, l'influence de la résistance de la pile est peu considérable; si à la limite on avait $\pi = 0$, il viendrait :

$$J_n = \frac{E}{\lambda},$$

limite inférieure de la valeur de l'intensité du courant, qui montre que dans ce cas cette intensité serait la même que s'il n'y avait qu'un couple.

nombre variable dans un circuit comprenant un galvanomètre et l'élément P qu'il s'agit d'étudier, cet élément étant orienté en sens contraire de la pile thermo-électrique. Soit C l'extrémité du fil que l'on déplace jusqu'à ce que le galvanomètre ne manifeste aucune déviation; lorsque cette condition sera remplie, on pourra être assuré que la force électromotrice cherchée de l'élément P est égale à celle des n éléments compris entre B et C (les éléments compris entre A et C n'agissent pas, comme n'étant pas dans le circuit), et le nombre n peut être pris comme mesure de cette force électromotrice qui pourra ainsi être comparée aux résultats des autres mesures effectuées de la même façon.

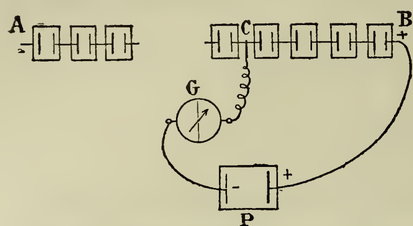


Fig. 79.

Il n'arrive pas toujours que l'on obtienne le retour au 0 de l'aiguille du galvanomètre; mais alors, pour deux positions successives de C, correspondant à n et à $n+1$ éléments, on a dans le galvanomètre deux courants en sens contraire. On peut alors être assuré que la force électromotrice cherchée est plus grande que celle de n des éléments pris comme terme de comparaison et plus petite que celle de $n+1$ des mêmes éléments.

On peut reconnaître à l'aide de ce procédé que la force électromotrice d'un couple dépend de sa nature, mais est indépendante de ses dimensions. C'est ce que l'on reconnaît aussi en opposant deux éléments de même nature et de dimensions différentes : on constate qu'il n'y a pas de courant.

Nous reviendrons ultérieurement sur cette question de la détermination des forces électromotrices, notamment pour indiquer les mesures absolues et les unités absolues choisies.

125. Mesure des résistances : pont de Wheatstone. — La méthode que nous avons indiquée (116) pour déterminer les résistances relatives n'est pas toujours commode à appliquer, et il peut être nécessaire d'employer un autre procédé dont nous pouvons maintenant donner la théorie.

Supposons que A et B soient deux points maintenus à des potentiels différents, quelconques d'ailleurs, par exemple en les réunissant aux pôles d'une pile, et soit un circuit complexe formé de 4 conducteurs AC, CB, BD, DA (fig. 80) de résistance $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4, réunis

entre eux par un conducteur CD, sur le trajet duquel est un galvanomètre. Pour des valeurs convenables des résistances, on peut arriver à ce que, quelle que soit la différence de potentiel, il n'y ait pas de courant dans le fil CD, ce dont on est assuré, parce que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro : le calcul [1] montre que pour que cette condition soit satisfaite, le rapport $\frac{\lambda_1}{\lambda_4}$ doit être égal au rapport $\frac{\lambda_2}{\lambda_3}$.

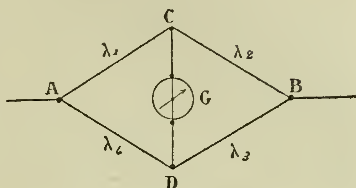


Fig. 80.

Si donc on connaît l'un de ces rapports, $\frac{\lambda_2}{\lambda_3}$ par exemple (ou les quantités elles-mêmes) et λ_4 on pourra calculer λ_1; et comme $\lambda_1 = \frac{l_1}{k_1 s_1}$ si on a l_1 et s_1 on déterminera dès lors k_1.

On pourra donc avoir en λ_3 et λ_2 des résistances fixes, connues une fois pour toutes, et plaçant en λ_1 le conducteur qu'il s'agit d'étudier il suffira, par un procédé quelconque, de faire varier λ_4 d'une manière continue jusqu'à ramener au 0 l'aiguille du galvanomètre.

126. Actions chimiques exercées par les courants ; électrolyse; ses lois. — Lorsque l'on se place dans des conditions convenables qui seront spécifiées ultérieurement, on parvient à réduire des corps chimiquement composés en substances plus simples. On dit alors que l'on effectue une *électrolyse;* le corps décomposé est *l'électrolyte* et les lames métalliques qui donnent au courant accès dans le liquide sont appelées *électrodes*. Comme conséquence d'une théorie à laquelle il n'y a pas lieu d'attacher d'importance, on appelle corps ou éléments *électro-négatifs* les corps qui dans la décomposition se rendent au pôle positif, et corps *électro-positifs* ceux qui se rendent au pôle négatif.

Pour qu'un corps puisse être électrolysé, deux conditions sont

1. Pour que le fil CD ne soit traversé par aucun courant, il faut et il suffit que les points C et D soient au même potentiel. Or si l'on appelle v ce potentiel, on a (117) :

pour le point C sur le conducteur ACB, $\frac{V_0 - v}{\lambda_1} = \frac{v - V}{\lambda_2}$,

et pour le point D sur le conducteur ADB, $\frac{V_0 - v}{\lambda_4} = \frac{v - V}{\lambda_3}$.

D'où, en divisant terme à terme, il vient :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_4} = \frac{\lambda_2}{\lambda_3}.$$

nécessaires : il faut que le corps soit à l'état liquide, il faut qu'il soit conducteur de l'électricité.

Le corps peut être amené à l'état liquide soit par dissolution dans un liquide, l'eau en général, soit par fusion ignée. On avait pensé d'abord que la présence de l'eau était indispensable; que ce corps seul était décomposé, ses éléments agissant pour produire des actions secondaires sur le corps en dissolution. Mais d'une part, on a vérifié directement que l'électrolyse se produit dans le cas de sel amené à l'état liquide par voie de fusion ignée, par exemple pour le chlorure de magnésium; d'autre part, on sait que l'eau est à peine décomposée par le passage d'un courant lorsqu'elle est pure et l'on ne saurait dès lors concevoir comment ce serait elle qui jouerait le rôle actif par le fait de la présence d'un corps dissous : sous peine d'être conduit à admettre des actions d'influence peu compréhensibles, il est évidemment plus simple de supposer que c'est le corps, non le dissolvant, qui a le rôle actif.

Nous ne nous occuperons pas de dissolutions dans un liquide autre que l'eau : la question, encore mal étudiée, est complexe. Nous considérerons seulement les composés métalliques, étant bien entendu que l'hydrogène doit être considéré comme métal.

127. — Dans toute électrolyse d'un sel métallique, le métal se rend au pôle négatif (c'est-à-dire qu'il se déplace dans le sens du courant), et l'on trouve au pôle positif, soit le corps simple (métalloïde), soit les éléments du radical avec lequel le métal était combiné.

C'est ainsi que, dans le cas du chlorure de magnésium, le magnésium se trouve au pôle négatif et le chlore au pôle positif. Si l'on a opéré sur du cyanure d'or, l'or se dépose au pôle négatif et le cyanogène (radical composé) se porte au pôle positif. Dans le cas d'un sel oxygéné, le sulfate de cuivre, par exemple, le cuivre se porte au pôle négatif et les éléments SO^3 et O du radical SO^4 qui existe dans le sel se portent au pôle positif.

128. — La règle précédente est générale pour les circonstances que nous avons précisées, mais elle ne signifie pas que l'on retrouve à chaque pôle les corps qui doivent s'y rendre d'après cette règle. Les éléments simples ou les radicaux composés ainsi mis en liberté par l'action du courant ne perdent pas leurs propriétés chimiques et, fort souvent, il se produit au sein du liquide ou au contact des électrodes des actions secondaires qui, indépendantes de l'action électrique, masquent les effets primordiaux.

Ces actions secondaires peuvent se produire au pôle négatif si le métal est susceptible de décomposer l'eau : c'est ce qui arrive

s'il s'agit d'un métal alcalin, par exemple : alors il y a production d'un hydrate alcalin en même temps que de l'hydrogène se dégage. On observe le dégagement de gaz, que l'on peut recueillir dans une éprouvette, et la présence de l'alcali est mise en évidence par l'emploi d'un réactif coloré (la teinture de violette, par exemple). On peut prouver que la formation de l'alcali est due à une action secondaire : il suffit de prendre pour électrode négative un globule de mercure avec lequel se combine le métal alcalin pour former un amalgame qui ne décompose pas l'eau, et d'où, par distillation, on peut extraire le métal.

Il importe de remarquer que l'action est d'ailleurs la même si le sel contient un *radical* métallique tel que l'ammonium ; on obtient alors, en opérant de la même façon, un amalgame d'ammonium d'où on peut retirer, non l'ammonium H^4 Az, il est vrai, mais les éléments constituants H et H^3 Az.

Des effets analogues peuvent s'observer également au pôle positif; si, par exemple, il s'agit d'un sulfate, le radical SO^4 ne peut exister à l'état de liberté, il agit sur l'eau pour redonner de l'acide sulfurique hydraté (sulfate d'hydrogène) et mettre de l'oxygène en liberté : on reconnaît directement le dégagement d'oxygène, et la formation d'acide est manifestée par l'action sur un réactif coloré. C'est en réalité cet effet qui se produit lorsque l'on électrolyse de l'*eau acidulée*, c'est-à-dire une dissolution de sulfate d'hydrogène dans l'eau. On trouve l'hydrogène (métal) au pôle négatif; du gaz oxygène se dégage (action secondaire) au pôle positif et il se reforme du sulfate d'hydrogène, de telle sorte que la constitution de la dissolution n'a pas changée et que tout semble s'être passé comme si l'eau seule avait été décomposée. On peut difficilement admettre qu'il en soit cependant ainsi, car l'eau distillée est à peine décomposée par le passage du courant; tandis que l'eau acidulée donne un rapide dégagement de gaz.

129. — Les actions secondaires se produisent également au contact des électrodes : si, par exemple, au pôle négatif, on met une lame de platine recouverte de peroxyde de plomb et plongeant dans de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, on ne verra aucun dégagement de gaz, mais le peroxyde de plomb aura diminué de poids parce qu'il aura été réduit en partie par l'hydrogène.

Si d'autre part on décompose un chlorure, un cyanure, et que l'électrode positive soit une lame d'argent ou d'or, il ne se produira aucun dégagement de gaz ; mais le chlore, le cyanogène auront at-

taqué l'électrode qui sera entrée en dissolution, comme on peut le vérifier par une pesée.

130. — Dans le cas de composés entre deux métalloïdes, il se produit, en général, une décomposition analogue ; mais on ne peut donner aucune règle absolue, un métalloïde pouvant, suivant les circonstances, se rendre à l'un ou à l'autre pôle : c'est ainsi que dans l'électrolyse de l'acide sulfureux, le soufre se rend au pôle positif tandis qu'il se porte au pôle négatif dans l'électrolyse du chlorure de soufre.

La question est encore plus complexe dans le cas des composés organiques, et l'on ne peut à l'avance indiquer de quelle manière se fera la décomposition.

131. — Il ne faut pas concevoir l'électrolyse comme produisant le transport des éléments matériels d'un pôle à l'autre ; mais on peut admettre l'idée d'action se propageant de proche en proche,

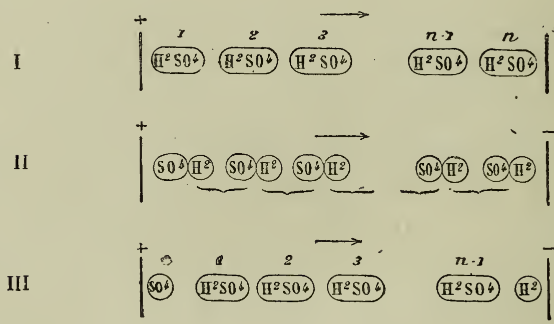


Fig. 81.

de molécule à molécule (hypothèse de Grothus). Le premier effet du courant sur un électrolyte (fig. 81, I) consisterait dans une *polarisation* moléculaire (II) suivie immédiatement d'une décomposition qui rendrait libres les éléments, lesquels rentreraient aussitôt en combinaison avec les éléments opposés des molécules voisines (III), de manière que deux éléments différents seraient seuls mis en liberté à l'extrémité de la chaîne considérée sans qu'il y ait eu aucun transport matériel. Cette chaîne ainsi reconstituée serait le siège d'une action analogue, et ainsi de suite.

132. — Il ne suffit pas d'étudier qualitativement les effets produits, il faut également indiquer les lois qui régissent le phénomène au point de vue de la quantité. Plusieurs lois doivent être signalées (lois de Faraday).

1re loi : *L'action électrolytique est indépendante de la position relative de la pile et de l'électrolyte.*

On le prouve en déplaçant l'appareil où se produit la décomposition dans le circuit, de telle sorte bien entendu que le circuit ne soit modifié que dans la place des parties constituantes. On reconnaît alors que la pile donnant un courant constant, ce que l'on vérifie à l'aide d'un galvanomètre placé dans le même circuit, la quantité d'électrolyte décomposé est la même pour le même temps.

Comme moyen de mesure, on emploie commodément le *voltamètre* (fig. 82), vase contenant de l'eau aiguisée d'acide sulfurique

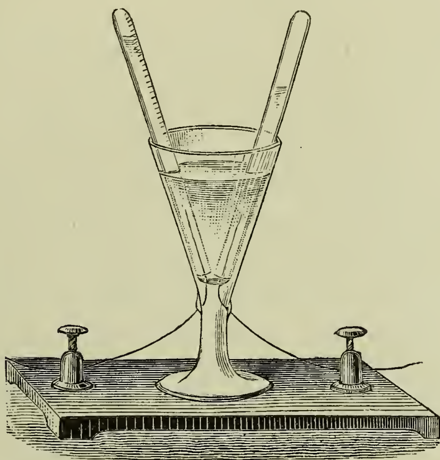


Fig. 82.

(sulfate d'hydrogène) et où les électrodes sont des fils de platine que l'on recouvre d'éprouvettes dans lesquelles se rendent d'une part l'hydrogène et de l'autre l'oxygène.

Comme conséquence de cette loi, ou comme vérification, on reconnaît que si l'on place des électrolytes de même composition chimique (quel que soit le titre de la dissolution) dans un même circuit, des quantités égales sont décomposées dans le même temps, quelle que soit la situation des électrolytes.

2e loi : *La quantité d'électrolyte décomposé est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a passé dans le circuit.*

On peut vérifier cette loi directement, comme nous l'avons indiqué pour l'action galvanométrique (113), en remplaçant seulement dans le circuit les galvanomètres par des voltamètres : on reconnaît alors que la quantité d'hydrogène dégagé est la même en

A et en D (fig. 73) d'une part, et d'autre part en B et en C, et que cette dernière quantité est la moitié de celle mesurée en A et en D.

On peut encore observer un voltamètre et un galvanomètre placés dans un même circuit, et l'on reconnaît que les quantités de gaz dégagé sont proportionnelles aux intensités du courant. On sait d'ailleurs, comme nous l'avons dit, que celles-ci sont proportionnelles aux quantités d'électricité qui circule pendant le même temps.

3[e] loi : *Si l'on place à la suite, dans un même circuit, des électrolytes différents, les quantités de métal mis en liberté sont dans le rapport de leurs poids atomiques.*

Cette loi s'explique sans qu'il soit nécessaire d'insister.

Il existe enfin une dernière loi, mais comme elle établit une relation entre les actions chimiques qui se produisent dans le circuit extérieur et celles qui se manifestent dans les éléments de pile, nous sommes obligés de la renvoyer après l'étude de ces dernières.

133. Courants électriques produits par les actions chimiques. — Ainsi que nous l'avons dit (103), il y a une relation de réciprocité entre les effets produits par les courants et les actions susceptibles de donner naissance à des courants électriques. Nous allons étudier maintenant les circonstances dans lesquelles des actions chimiques produisent des courants électriques.

Considérons une lame C (fig. 83) de zinc *pur* (ou une lame de cadmium) plongée dans de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique : par ce seul fait, une différence de potentiel s'établira entre le liquide et le zinc, sans qu'il se produise aucune action chimique appréciable. L'introduction dans le liquide d'une lame de platine A, inattaquable par l'acide sulfurique, ne changera rien à ce point de vue : si l'on vient à réunir les deux lames par un conducteur, il y aura production d'un courant (96); mais en même temps on observera un dégagement de gaz, de l'hydrogène, sur la lame de platine qui est le pôle positif de l'élément de pile ainsi formé, et du zinc se dissoudra donnant naissance à du sulfate de zinc, c'est-à-dire qu'il y aura eu simple substitution du métal zinc au métal hydrogène dans le *sulfate d'hydrogène*. Si l'on rompt le circuit, le courant cesse, les deux pôles conservant

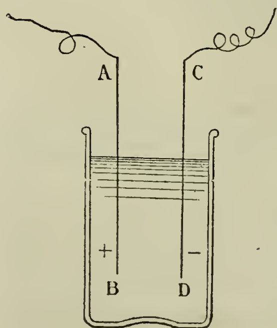


Fig. 83.

leur différence de potentiel initiale et en même temps l'action chimique cessera : le gaz ne se dégagera plus, le poids du zinc ne variera plus. On pourra d'ailleurs reproduire cette action, en fermant de nouveau le circuit, tant que tout le zinc n'aura pas été dissous ou que le sulfate d'hydrogène ne sera pas entièrement transformé en sulfate de zinc.

Dans ce cas la production du courant et l'action chimique sont liées entre elles intimement et l'on trouve naturellement, à ce qu'il semble, l'origine du courant dans l'action chimique. On peut bien admettre que le contact établit une différence de potentiel; mais le courant étant susceptible de produire extérieurement des effets divers correspondant à une dépense d'énergie, il faut nécessairement trouver quelque part l'origine de cette énergie : ce ne peut être le seul contact, car les corps se trouvant constamment dans le même état on ne voit pas où serait le phénomène dont le courant serait la manifestation ; tandis que dans l'action chimique, il y a des combinaisons qui correspondent à des affinités satisfaites, il y a une certaine dépense qui serait la source de l'énergie extérieure.

134. — Nous ne voulons point discuter ici les raisons qui ont été données pour ou contre la théorie du contact : la source chimique du courant nous paraît justifiée par ce que nous venons de dire; nous nous bornerons à signaler quelques faits intéressants.

Plaçons deux lames d'or dans de l'acide azotique pur et complétons le circuit en y plaçant un galvanomètre : il ne se produira rien; mais il y aura production d'un courant si, à l'aide d'une pipette, on verse quelques gouttes d'acide chlorhydrique sur une des lames seulement : il y aura formation d'eau régale, la feuille d'or sera dissoute et deviendra le pôle négatif ; lorsque l'action chimique sera épuisée, on pourra obtenir un courant en sens contraire, en versant l'acide chlorhydrique à l'autre pôle, de telle sorte que l'existence et le sens du courant électrique sont bien, dans ce cas, déterminés par l'existence et le sens de l'action chimique, le métal attaqué étant le pôle négatif.

On reconnaît facilement, en employant deux métaux inégalement attaquables par un acide, qu'il y a encore production d'un courant et que c'est toujours le métal le plus attaqué qui est le pôle négatif.

Il est facile de montrer par d'autres exemples que c'est l'action chimique qui détermine le sens du courant : faisons communiquer avec un galvanomètre deux lames, l'une de cuivre et l'autre de plomb, et plongeons-les dans une dissolution d'un sulfure alcalin; le plomb sera attaqué seul ou tout au moins plus que le cuivre; extérieu-

rement le courant ira du cuivre au plomb. Remplaçons le liquide par une dissolution d'acide azotique, c'est alors le cuivre qui est le plus attaqué : le courant va extérieurement du plomb au cuivre.

Cette propriété a permis à M. Fleming de construire une pile (fig. 84) dans laquelle il n'y a aucun contact métallique hétérogène et qui cependant donne naissance à un courant, ce qui est contraire à la théorie du contact telle que l'avait imaginée Volta. Cette pile est composée d'un nombre pair de vases dans lesquels on place alternativement de l'acide azotique et une dissolution de sulfure de sodium; on réunit ces vases par des lames de métal courbé qui sont alternativement les unes en cuivre et les autres en plomb. En ayant soin que les lames extrêmes soient en cuivre comme les fils formant le circuit extérieur, il n'y a aucun contact métallique hétérogène, et pourtant un galvanomètre interposé indique l'existence d'un courant.

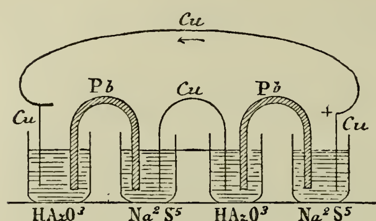


Fig. 84.

135. — Il n'est pas nécessaire qu'il y ait un métal attaqué pour faire naître un courant dans un circuit : il suffit qu'il y ait une action chimique continue, par exemple une double substitution entre deux sels métalliques. On fait communiquer avec un galvanomètre, d'une part de l'eau acidulée de *sulfate d'hydrogène*, de l'autre une pince de platine contenant un fragment de potasse caustique (*hydrate de potassium*) : il y aura finalement production de sulfate de potassium et d'eau ($H^2SO^4 + 2KHO = K^2SO^4 + 2H^2O$) ; un courant se manifestera dans le fil, et la potasse sera le pôle négatif.

136. — Il importe de bien comprendre :

1° Que le courant est établi en réalité, non pas par suite de la différence de potentiel qui existe entre le zinc et le cuivre, mais par suite de la différence de potentiel qui se manifeste entre le zinc et la couche de liquide en contact avec le métal. L'établissement de cette différence de potentiel nous paraît devoir être considéré comme la conséquence de l'action chimique qui se manifeste tout d'abord, mais qui est arrêtée dès que la différence de potentiel a une valeur déterminée. Si le circuit n'est pas fermé, le zinc et le conducteur avec lequel il est en contact sont au même potentiel, d'une part, tandis que le liquide en entier et le cuivre sont,

d'autre part, à un potentiel différent, mais qui est le même pour le cuivre et le liquide. Si l'on ferme le circuit, l'équilibre électrique tend à s'établir et la différence de potentiel entre le métal et le liquide en contact diminuerait; mais alors, l'action chimique se reproduit, tendant ainsi à maintenir constante la différence de potentiel : il s'établit un régime permanent et l'électricité part des couches de liquide au contact du zinc, traverse le liquide, le cuivre, le fil interpolaire pour arriver au zinc, de telle sorte que les divers points du liquide ne sont pas au même potentiel, pas plus que cela n'a lieu pour les différents points du circuit considéré ;

2° Que, dans la pile, le courant va de la couche de liquide qui est en contact avec le zinc (on dit ordinairement : du zinc) au cuivre, tandis que dans le circuit interpolaire le courant va du cuivre au zinc ;

3° Que lorsque le courant est établi, si l'on imagine que l'élément de pile et le circuit interpolaire sont remplacés par le fil type ayant la longueur réduite correspondante, la différence de potentiel entre deux points quelconques sera toujours proportionnelle à la distance (réduite) qui sépare ces deux points.

137. — L'expérience montre que, dans les piles que nous avons indiquées sommairement, le courant n'est pas constant et qu'il diminue rapidement : la cause de cette action doit être considérée comme une conséquence de l'action chimique même qui a produit le courant et qui a modifié la composition des corps en présence. On peut démontrer en effet que, par le fait même de cette action chimique, il y a une tendance à la production d'un courant contraire, les *électrodes sont polarisées*, suivant l'expression consacrée.

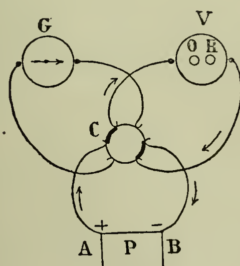


Fig. 85.

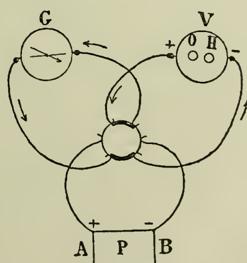


Fig. 86.

Il est facile de reconnaître que cette action se manifeste pour les actions chimiques extérieures à la pile ; pour le démontrer, mettons dans un circuit une pile P (fi . 85) et un voltamètre V, et disposons à

côté un galvanomètre G : il y aura électrolyse et l'on recueillera les gaz dans les éprouvettes, l'hydrogène au pôle négatif, l'oxygène au pôle positif; lorsque la décomposition sera assez avancée, à l'aide d'un commutateur C, mettons la pile hors du circuit et introduisons le galvanomètre à la place (fig. 86). L'aiguille de cet instrument sera déviée aussitôt et indiquera un courant allant de l'éprouvette d'oxygène, jouant le rôle de pôle positif, à l'éprouvette d'hydrogène, jouant le rôle de pôle négatif, c'est-à-dire que le voltamètre sera traversé alors par un courant allant de l'hydrogène à l'oxygène, tandis que pendant la décomposition le courant allait en sens contraire. En même temps que se produit ce courant inverse, les gaz disparaissent peu à peu et lorsque les éprouvettes n'en contiennent plus, le courant cesse : il avait donc son origine dans la recomposition observée.

Le résultat est le même lorsque les électrodes sont de simples lames de platine, ou mieux de platine platiné, par suite de l'existence de gaz condensés sur ces solides.

138. — Il est aisé d'admettre que dans un élément de pile où il y a une décomposition chimique, un effet analogue doit se manifester et qu'il y a une tendance à la production d'un courant inverse qui ne peut se mettre en évidence directement, mais qui produit un affaiblissement du courant principal et qui, à un moment donné, peut lui faire équilibre et empêcher dès lors toute manifestation ultérieure. Voici comment on peut comprendre les effets que nous signalons :

Considérons la pile formée de platine (ou de cuivre) et de zinc plongés dans l'eau aiguisée d'acide sulfurique; il y a action chimique du zinc sur le sulfate d'hydrogène et, comme conséquence, formation de sulfate de zinc en même temps que de l'hydrogène se dégage sur le platine. (Nous négligeons l'affaiblissement de l'eau acidulée, affaiblissement que l'on pourrait compenser en versant une nouvelle quantité d'acide, mais qui, en tout cas, agit dans le sens d'une diminution du courant). Il y aura d'abord un premier effet : la couche de gaz hydrogène condensé est un moins bon conducteur que le métal et, par là même, diminue l'intensité du courant; mais surtout il se produit une réaction entre l'hydrogène et le sulfate de zinc qui, seule, donnerait naissance à un courant inverse, mais dont, en réalité, l'effet est d'affaiblir le courant principal.

139. — On peut s'assurer que les effets d'affaiblissement sont bien dus à ces actions complexes qui sont définies dans leur ensemble sous le nom, assez peu satisfaisant d'ailleurs, de *polarisa-*

tion des électrodes, d'abord en constatant que ces effets disparaissent lorsque, par suite d'une disposition spéciale, on empêche le dépôt d'hydrogène sur le pôle positif, comme nous allons le dire, puis directement en analysant une intéressante expérience de L. Foucault.

L. Foucault construisit une pile (fig. 87) comprenant du zinc au pôle négatif, du mercure au pôle positif et une dissolution de sulfate de sodium comme liquide actif. Ce sel est décomposé par le zinc : il se forme du sulfate de zinc, et du sodium se porte au pôle positif où il se dissout dans le mercure, formant une couche superficielle d'amalgame de sodium. Mais ce dernier métal agit à son tour sur le sulfate de zinc formé, pour donner lieu à une action inverse, action qui croît avec la richesse de l'amalgame et qui rapidement arrive à faire équilibre à l'action primitive : le courant qui a diminué d'intensité cesse alors absolument, la polarisation des électrodes est complète. On peut d'ailleurs, par une simple action mécanique, faire de nouveau naître le courant : il suffit d'agiter le mercure, l'amalgame se répand dans toute la masse, et la richesse de la couche superficielle diminue d'autant, si bien que son action sur le sulfate de zinc est devenue plus faible que l'action du zinc sur le sulfate de sodium, et que le courant provenant de cette dernière action l'emporte et se manifeste de nouveau au galvanomètre. Puis bientôt les mêmes effets se reproduisent et le courant cesse : on peut à plusieurs reprises recommencer l'expérience, jusqu'à ce que la masse entière du mercure soit assez riche en sodium pour équilibrer l'action du zinc.

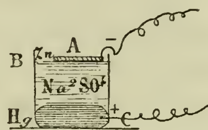


Fig. 87.

Cette expérience, qui montre bien le phénomène de la polarisation des électrodes dans tous ses détails, peut d'ailleurs être poussée plus loin et est d'autant plus instructive. On peut, en effet, faire traverser cette pile par un courant pendant un temps même très court, de manière à provoquer la continuation de l'action qui s'était manifestée, c'est-à-dire que le mercure communiquant à un pôle négatif s'enrichit en sodium, tandis qu'il se forme d'autre part du sulfate de zinc. Supprimons l'action de la pile et fermons le circuit en y introduisant un galvanomètre : l'action du sodium est alors devenue prépondérante, et le courant marche en sens contraire de ce qui se produisait dans la première partie ; mais alors l'amalgame s'affaiblit en sodium et le courant s'arrête ; seulement l'affaiblissement a été d'abord superficiel et l'on peut faire renaître le courant

en agitant l'amalgame, ce qui fait arriver du sodium des parties profondes à la surface : il est même possible de répéter plusieurs fois cette action, mais la masse d'amalgame s'affaiblit peu à peu et on arrive en sens contraire au résultat indiqué précédemment, où l'action de l'amalgame sur le sulfate de zinc fait exactement équilibre à l'action du zinc sur le sulfate de sodium.

140. — La pile de Volta, et nous verrons qu'il en est de même pour la plupart des piles effectivement employées, est basée sur l'emploi d'une électrode de zinc qui se dissout et entre en combinaison. Les actions chimiques qui se produisent alors méritent d'être examinées en détail.

Imaginons un élément (133) dans lequel l'électrode négative serait constituée par un métal chimiquement pur, du zinc ou quelquefois du cadmium plus facile à obtenir à l'état de pureté, et supposons l'autre électrode constituée par une lame de platine. Au moment où les plaques métalliques seront plongées dans l'eau acidulée, elles prendront des potentiels différents, quelques bulles d'hydrogène apparaîtront sur le zinc, puis tout s'arrêtera et l'action chimique ne se produira pas tant que le circuit restera ouvert (136).

Si l'on vient alors à fermer le circuit, le courant se manifestera, le zinc se dissoudra peu à peu, en même temps que, par suite d'une action chimique qui se produira suivant les mêmes lois que celles qui président à l'électrolyse, l'hydrogène mis en liberté suivra le sens du courant (127) et viendra se dégager en bulles sur le platine. L'action chimique cessera lorsque le circuit interpolaire sera rompu.

Si l'on fait usage de zinc du commerce, on reconnaît que les choses se passent différemment; que, lorsque le circuit n'est pas fermé, il y a un dégagement continu d'hydrogène, ce qui entraîne nécessairement une dissolution de zinc, et par suite une dépense effective, alors que l'on ne recueille rien comme courant; et que, d'autre part, quand le circuit est fermé, il se dégage de l'hydrogène à la fois sur le zinc et sur le platine.

Ces effets s'expliquent facilement en remarquant que le zinc du commerce n'est pas pur, et que les matières étrangères qu'il contient par places forment avec lui autant de circuits permanents qui sont naturellement fermés d'une manière constante, ce qui explique l'action chimique, la dépense de zinc qui se produit même lorsque le circuit n'est pas fermé. D'autre part, lorsque le circuit est fermé, on ne recueille pas dans le fil interpolaire toute l'électricité correspondante à la dépense de zinc, puisqu'une partie de cette électricité circule dans ces circuits partiels qui se forment sur place. Par

suite, dans tous les cas l'emploi du zinc du commerce est désavantageux.

On ne peut cependant employer le cadmium ni le zinc pur, dont le prix est trop élevé; mais Davy a reconnu heureusement que le zinc préalablement amalgamé se comporte comme le zinc pur, c'est-à-dire qu'il n'est pas attaqué d'une manière continue tant que le circuit n'est pas fermé, et que lorsque le circuit est fermé le dégagement de l'hydrogène a lieu sur le cuivre, ce qui indique qu'il ne s'est pas produit de courants partiels fermés sur eux-mêmes et diminuant d'autant l'action du courant qui se manifeste dans le circuit interpolaire.

L'amalgamation des zincs se fait d'ailleurs d'une manière simple : il suffit de plonger les lames de ce métal dans un vase contenant du mercure recouvert d'une couche d'acide sulfurique qui, décapant le métal, le met dans l'état le plus propre à se combiner avec le mercure; les résultats sont particulièrement satisfaisants si l'on aide à l'action par quelques frictions. On arrive à un résultat également satisfaisant en plongeant simplement le zinc deux ou trois fois dans une dissolution d'azotate de mercure.

141. Pile sans polarisation. — Becquerel est le premier (1829) qui ait cherché à obtenir un courant constant en évitant la polarisation des électrodes; nous ne décrirons pas sa pile, qui d'ailleurs se rapproche beaucoup de celle de Daniell dont nous parlerons plus loin, et nous nous occuperons d'abord de piles dans lesquelles la dépolarisation est obtenue sans qu'il soit nécessaire d'employer plus d'un liquide. Nous signalons seulement les types qui sont devenus classiques; la description complète des modèles employés dans l'industrie sera donnée plus tard.

D'après ce que nous avons dit, on conçoit que c'est l'hydrogène libre qui produit une force électromotrice inverse, et que la solution du problème consiste à faire entrer cet élément dans une combinaison de manière à s'opposer à la production d'une action chimique ultérieure.

Pile au chlorure d'argent. — La pile de Warren de la Rue est constituée par un vase dans lequel sont placés une lame de zinc et un fil d'argent recouvert de chlorure d'argent; le liquide est une dissolution de chlorure de sodium ou d'ammonium. Il se forme du chlorure de zinc avec dégagement du métal; mais cet élément agit sur le chlorure d'argent pour reformer du chlorure, en mettant l'argent en liberté. Par suite de l'état du chlorure d'argent, l'argent est réduit à l'état spongieux et cet état permet au gaz d'agir

sur le chlorure jusqu'au centre du cylindre. Cette pile a reçu dans la pratique diverses formes que nous décrirons dans un autre chapitre.

Pile Leclanché. — Dans cette pile qui, sous ses divers modèles, a reçu de très nombreuses applications, le métal attaqué est encore le zinc ; le liquide est une dissolution saturée de sel ammoniac (chlorure d'ammonium) ; le corps qui forme le pôle positif est constitué par un mélange de fragments de coke concassé et de grains assez gros de bioxyde de manganèse. L'hydrogène mis en liberté réduit partiellement le bioxyde de manganèse qu'il ramène à l'état de sesquioxyde.

Il ne paraît pas se former seulement du chlorure de zinc, mais bien des corps complexes dans lesquels entre ce sel (chlorure double de zinc et d'ammonium : oxychlorure de zinc?).

142. Piles a deux liquides. — *Pile de Daniell.* — La solution primitive indiquée par Becquerel consistait à employer deux liquides distincts, l'un agissant pour produire l'action chimique et l'autre pour produire la dépolarisation; Daniell a adopté ce type.

La pile de Daniell (fig. 88) est formée d'un vase divisé en deux parties par une cloison poreuse, en porcelaine dégourdie (la forme réelle importe peu d'ailleurs). D'un côté on place de l'eau aiguisée d'acide sulfurique dans laquelle plonge une lame de zinc qui sera le pôle négatif ; de l'autre, on met une dissolution de sulfate de cuivre (saturée pour qu'elle offre moins de résistance au passage du courant) où plonge une lame de cuivre.

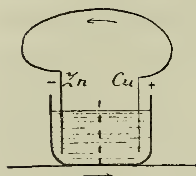


Fig. 88.

L'effet produit est le suivant : il y a substitution du zinc à l'hydrogène dans le sulfate d'hydrogène et par suite dissolution du zinc dans le liquide qui se charge peu à peu de sulfate de zinc ; l'hydrogène mis en liberté traverse la paroi poreuse (il faut, bien entendu, toujours admettre l'action se produisant de proche en proche) et agit sur le sulfate de cuivre par voie de substitution; il se reforme du sulfate d'hydrogène, et du cuivre mis en liberté se dépose sur l'électrode cuivre. Celui-ci, qui sert de pôle positif, ne subit donc aucune modification autre qu'un accroissement de poids; sa surface reste du cuivre et par suite, outre qu'elle ne modifie pas la résistance au courant, ne tend pas à donner naissance à un courant de polarisation, courant inverse.

Il importe beaucoup de remarquer que les substitutions se fai-

sant équivalent à équivalent, on retrouve à la fin la même quantité d'acide sulfurique qu'au commencement et que la seule différence consiste en ce qu'il s'est produit du sulfate de zinc à la place d'une quantité équivalente de sulfate de cuivre, ce qui a amené la dissolution d'une certaine quantité de zinc et le dépôt d'une quantité équivalente de cuivre.

Cette remarque explique ce qui se passe dans une modification de la pile de Daniell, modification qui ne contient pas d'acide. La forme générale est la même et l'on trouve d'un côté du zinc et une dissolution saturée de sulfate de zinc, de l'autre du cuivre et une dissolution saturée de sulfate de cuivre. Il est clair que séparément chaque métal ne peut agir sur la dissolution correspondante; mais il y a une action quand les deux dissolutions sont séparées seulement par la cloison poreuse, et peut-être même par suite de l'existence des pores (électro-capillarité de Becquerel). Il faut admettre qu'il y a décomposition moléculaire après polarisation des molécules, comme il a déjà été dit, puis recomposition, de telle sorte qu'il y aurait après cette action élémentaire, qui d'ailleurs se reproduirait continuement, une molécule de sulfate de cuivre remplacée par une molécule de sulfate de zinc et, comme conséquence dissolution d'une molécule de zinc et dépôt d'une molécule de cuivre au pôle positif sur le cuivre. On voit donc que, sauf que l'on ne voit pas le point de départ de l'action chimique, de la même façon que dans la pile de Daniell, le résultat final est absolument le même.

Pile de Grove, pile de Bunsen. — Parmi les autres modèles de piles qui ont été proposés et employés, nous décrirons seulement ici la pile de Grove et celle de Bunsen, renvoyant à un autre chapitre pour l'indication des éléments divers qui se rencontrent dans les applications industrielles. La pile de Grove contient également deux liquides séparés par une cloison poreuse, de l'eau acidulée d'acide sulfurique dans laquelle plonge une lame de zinc, d'une part; et d'autre part, de l'acide azotique et une lame de platine. Il y a production d'hydrogène et de sulfate de zinc, et l'hydrogène produit, passant à travers la paroi poreuse, réduit l'acide azotique qui donne naissance à des composés nitreux, moins oxygénés, dont la nature n'est pas bien déterminée (bioxyde d'azote, acide azoteux ou peroxyde d'azote) et dont une partie reste en dissolution dans le liquide, l'autre partie se dégageant sous forme de vapeurs rutilantes. Le zinc est l'électrode négative, le platine sert de pôle positif.

Le platine ne jouant ici d'autre rôle que celui de conducteur, ne

subissant aucune action chimique et étant d'un prix élevé, Bunsen eut l'idée de le remplacer par du charbon des cornues, corps également conducteur et inattaquable par l'acide azotique ; on se sert aujourd'hui de charbons artificiels préparés spécialement à cet effet et donnant les mêmes résultats.

143. *Pile au bichromate de potasse.* — La pile au bichromate de potasse, qui a reçu des formes diverses que nous indiquerons dans un autre chapitre, est en réalité une pile à deux liquides agissant différemment quoique mélangés, et non séparés par une cloison poreuse. Elle est basée sur ce qu'un mélange de bichromate de potasse et d'acide sulfurique est susceptible de donner naissance à un dégagement d'oxygène.

La pile comprend une lame de zinc et une lame de charbon, qui seront les deux pôles, plongées dans un liquide constitué par une dissolution de bichromate de potasse dans de l'eau assez fortement acidulée par de l'acide sulfurique.

Le zinc est attaqué par une partie de l'acide sulfurique (sulfate d'hydrogène) il se produit du sulfate de zinc et de l'hydrogène qui, à l'état naissant, et au contact de la dissolution du bichromate de potasse dans l'eau acidulée, se combinera avec l'oxygène que peut dégager ce mélange en donnant naissance à des composés de chrome, notamment à de l'alun chromo-potassique.

L'hydrogène entrant ainsi en combinaison, il y a dépolarisation ; en réalité cette dépolarisation n'est pas complète et le courant s'affaiblit, quoique moins rapidement que dans la pile à un seul liquide.

144. Piles a gaz et batteries secondaires. — Les actions de polarisation dont nous avons parlé et auxquelles donnent naissance les électrolyses ont été utilisées dans les piles à gaz de Grove et dans les piles ou batteries secondaires.

La pile à gaz de Grove (fig. 89) est constituée par une série de voltamètres placés à la suite et que l'on introduit dans un circuit où se trouve une pile suffisamment puissante pour provoquer la décomposition du sulfate d'hydrogène. Lorsque les éprouvettes sont pleines, la pile est chargée et, placée dans un circuit, elle peut à son tour donner naissance à un courant qui persiste aussi longtemps que les gaz n'ont pas disparu en se recombinant. Il est bien évident que dans ce cas, comme pour l'électrolyse, il n'est pas nécessaire d'admettre que ce sont les deux gaz placés dans les éprouvettes qui se sont recombinés directement, mais bien qu'il y a eu des polarisations suivies de décompositions et de recompositions moléculaires.

145. — Les batteries secondaires sont basées sur le même prin-

cipe et seront décrites plus loin ; elles reposent sur les modifications que subissent les lames de plomb plongées dans de l'eau acidulée d'acide sulfurique lorsqu'elles sont mises en rapport avec les pôles d'une pile. Il y a électrolyse et les gaz sont condensés ou combinés avec ces électrodes ; on a donc formé une pile à gaz, analogue à la pile de Grove et se comportant de la même façon. Nous voulons seulement indiquer ici l'intérêt de ces appareils.

Une batterie secondaire emmagasine une grande somme d'énergie qui est communiquée par une pile faible agissant pendant un assez long temps : lorsque, séparée de cette pile, elle agit comme source de force électromotrice, elle dépense en peu de temps cette énergie qui peut alors produire des effets de courte durée,

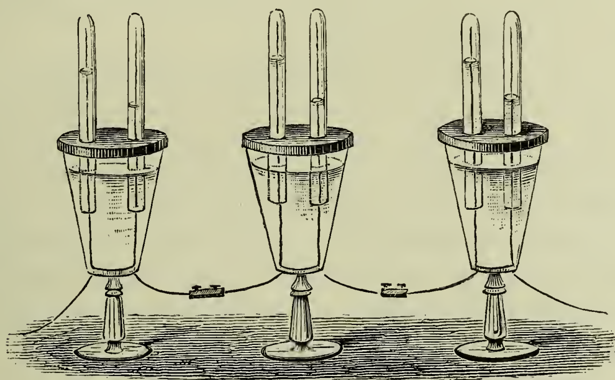


Fig. 89.

mais beaucoup plus puissants que ceux que la pile primaire aurait pu fournir. En un mot, une batterie secondaire peut être considérée comme jouant le rôle que, en mécanique, remplissent les accumulateurs de quelque nature qu'ils soient. Il y a là une modification de forme de l'action qui, comme toute transformation, ne peut se produire sans perte, mais qui dans des circonstances données est susceptible d'être utile pour la production d'un effet déterminé.

146. — Faraday a étudié les actions chimiques qui se passent dans les piles comparativement à celles qui se produisent dans les électrolytes traversés par le courant, et il a trouvé la loi suivante qui complète celles que nous avons données précédemment (132) :

4e loi. — *Il y a autant d'équivalents de zinc dissous dans chaque élément de pile qu'il y a d'équivalents de métal mis en liberté dans chaque électrolyte faisant partie du même circuit.*

Il faut remarquer que la loi n'est applicable que s'il y a effectivement électrolyse : elle ne nous apprend rien sur la possibilité de produire cette action, et c'est en nous appuyant sur d'autres notions que nous pourrons arriver à préciser quelque chose à ce sujet.

Dans les piles que nous avons décrites, il peut y avoir un métal mis en liberté; ce métal, l'hydrogène dans la pile de Volta, le cuivre dans la pile de Daniell, se meut dans la pile, comme dans le circuit interpolaire, dans le sens du courant, allant, par conséquent, du zinc au cuivre. Comme il y a un équivalent de métal mis en liberté pour chaque équivalent de zinc dissous, on voit que les actions chimiques de décomposition qui se manifestent dans un circuit, soit dans la pile, soit dans le fil interpolaire, obéissent toutes aux lois de Faraday. Il est bien entendu que, dans tous les cas, des effets secondaires qui ne sont pas dus à l'action du courant peuvent masquer ces résultats généraux.

147. — Une conséquence importante de ces remarques, c'est que la quantité d'électricité qui passe dans un circuit, quantité que nous avons reconnue être proportionnelle aux quantités de métal déposé dans l'électrolyse, est par suite proportionnelle à la quantité de zinc dissoute dans chaque élément de pile, et cela quelle que soit la nature de ces éléments ; la différence de constitution des éléments produit des variations dans la différence de potentiel, change l'intensité parce qu'il ne faut pas le même temps pour dissoudre le même poids de zinc, mais ne modifie en rien la quantité d'électricité produite pour le même poids de zinc dissous.

148. Forces électromotrices des piles hydro-électriques. — Nous avons indiqué (124) comment il est possible de comparer les forces électromotrices de diverses piles. M. J. Regnauld a fait à cet égard un travail intéressant qui nous fournira quelques résultats numériques importants.

L'expérience montre d'abord que la force électromotrice d'un élément dépend de la nature des corps qui le constituent et par suite des actions chimiques qui s'y produisent, mais non de la grandeur de la surface, de telle sorte que deux éléments de même composition et de dimensions aussi différentes que l'on voudra, placés en opposition, se font équilibre l'un à l'autre absolument. Cela ne veut pas dire, bien entendu, que l'un des éléments puisse remplacer l'autre dans un circuit pour donner le même courant, car ces éléments de grandeurs différentes introduisent des résistances qui n'ont pas la même valeur, résistances d'autant plus considérables que l'élément est plus petit, et ces différences de

résistances entraînent des changements dans l'intensité du courant correspondant.

M. J. Regnauld, prenant comme terme de comparaison des éléments thermo-électriques cuivre-bismuth dont les soudures étaient maintenues les unes dans de la glace fondante, les autres dans l'eau bouillante, détermina par la méthode d'opposition les valeurs relatives de divers éléments; voici quelques-uns des résultats obtenus, l'unité étant la force électromotrice de l'élément thermo-électrique ci-dessus défini :

Zinc pur, sulfate de zinc — Cadmium, sulfate de cadmium	55
Zinc amalgamé, eau et acide sulfurique $\left(\frac{1}{5}\right)$ — Cadmium, sulfate de cadmium	58
Zinc pur, sulfate de zinc — Cuivre, sulfate de cuivre	175
Zinc amalgamé, eau et acide sulfurique $\left(\frac{1}{10}\right)$ — Cuivre, sulfate de cuivre	179
Zinc amalgamé, eau et acide sulfurique $\left(\frac{1}{10}\right)$ — Platine, eau et acide azotique $\left(\frac{1}{5}\right)$	310

149. Effets calorifiques produits par les courants. — La production d'un courant électrique donne lieu à des effets calorifiques, tant dans le circuit qu'il traverse que dans la pile qui lui a donné naissance : il y a d'ailleurs réciprocité, et des actions calorifiques peuvent donner lieu à la production de courants électriques. Nous allons étudier successivement les diverses questions qui se rattachent à cet ordre d'idées.

Considérons une partie du circuit extérieur à la pile : l'expérience montre que le conducteur s'échauffe sous l'influence du passage du courant. L'échauffement se produit dans tous les cas, même dans le cas où le conducteur est liquide; mais il varie beaucoup avec les circonstances : à peine sensible si le conducteur a un diamètre un peu fort, l'élévation de température est notable si le fil est fin, et celui-ci peut être amené à l'incandescence; il peut même être fondu et volatilisé.

Joule a étudié les quantités de chaleur dégagées dans des circonstances données, et il a trouvé les deux lois suivantes :

1re loi. — *La quantité de chaleur dégagée dans l'unité de temps par le passage d'un courant électrique dans un conducteur, est proportionnelle à la résistance de ce conducteur.*

2e loi. — *Elle est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.*

On a donc la relation :

$$q = \mathrm{H}\,\lambda\,\mathrm{I}^2,$$

dans laquelle q est la quantité de chaleur dégagée dans l'unité de temps, λ la résistance du conducteur considéré, I l'intensité du courant; H est une constante.

Des expériences calorimétriques ont montré que cette loi s'applique également aux quantités de chaleur dégagées dans les couples.

Il résulte de la 1re loi que, à la condition de prendre dans un circuit des parties d'égale résistance, la quantité de chaleur dégagée dans un temps donné est constante pour un même courant et peut servir à définir ce courant, à donner son intensité thermique.

Ajoutons que si, dans un conducteur liquide, il y a électrolyse, on ne retrouve plus la même quantité de chaleur, au moins sous forme sensible, et la loi n'est applicable que si l'on tient compte de la chaleur qui correspond à la décomposition de l'électrolyte.

150. — Ces lois expliquent différentes expériences, par exemple celle de Children dans laquelle on constitue une chaîne avec des métaux différents ou de diamètres différents : les chaînons correspondant aux métaux les plus résistants ou aux diamètres les plus fins deviennent plus lumineux que les autres lorsque la chaîne est traversée par un courant qui la porte à l'incandescence.

Becquerel a montré que lorsque l'on plonge dans l'eau ou dans un mélange réfrigérant une partie du conducteur, l'autre devient plus chaude, et, si elle était portée à l'incandescence, peut arriver à la fusion. C'est que le refroidissement diminue la résistance d'une partie du circuit, augmente l'intensité du courant, et par suite la quantité de chaleur dégagée dans une partie donnée.

151. — Considérons un circuit formé de plusieurs conducteurs placés à la suite et de résistance λ_1 λ_2... λ_n et d'une pile de longueur réduite π : si q_1, q_2... q_n, q sont les quantités de chaleur dégagées dans l'unité de temps, et I l'intensité du courant, on a :

$$\begin{aligned} q_1 &= \mathrm{H}\,\lambda_1\,\mathrm{I}^2 \\ q_2 &= \mathrm{H}\,\lambda_2\,\mathrm{I}^2 \\ \dots &\quad \dots\dots \\ q_n &= \mathrm{H}\,\lambda_n\,\mathrm{I}^2 \\ q &= \mathrm{H}\,\pi\,\mathrm{I}^2 \end{aligned}$$

et si Q est la quantité totale de chaleur dégagée, on a :

$$\mathrm{Q} = \mathrm{HI}^2\,(\Sigma\lambda + \pi).$$

Mais nous avons montré que l'on a (119) :

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{E}}{\Sigma\lambda + \pi}.$$

Donc, il vient :

$$Q = H E I,$$

et si nous voulons avoir la quantité de chaleur dégagée dans un temps t, on aura :

$$Q t = H E I t.$$

Nous aurions, de la même manière, pour représenter la quantité de chaleur dégagée dans une partie du circuit pendant le temps t :

$$q_n t = H E t I \frac{\lambda_n}{\Sigma\lambda + L}.$$

Nous pouvons chercher à évaluer les quantités de chaleur dégagée en fonction de la quantité d'électricité qui a traversé le circuit.

D'après ce que nous avons dit, la quantité d'électricité qui passe dans une section du circuit dans un temps t est mesurée par It (113), si l'on a fait choix d'unités convenables. Si donc nous représentons par e cette quantité d'électricité, il vient :

$$Q t = H E e,$$

c'est-à-dire que la quantité totale de chaleur développée dans une pile donnée est proportionnelle à la quantité de l'électricité, et par suite proportionnelle à la quantité de zinc dissous dans chaque élément de pile, en admettant qu'il ne se produise dans le circuit aucun effet soit chimique, soit mécanique.

La quantité de chaleur dégagée dans chaque partie du circuit est proportionnelle à la résistance de cette partie. Si donc on a une pile *fermée sur elle-même*, c'est-à-dire dont les pôles sont réunis par un fil gros et court, la chaleur correspondant à l'action chimique se trouvera tout entière dégagée dans la pile; si au contraire le fil interpolaire est résistant, long et fin, il s'y dégagera une notable quantité de chaleur et, par contre, la pile s'échauffera peu.

152. — Toutes ces conséquences ont été vérifiées par Favre à l'aide du calorimètre à mercure; tantôt il plaçait dans l'ampoule plongée dans le mercure du réservoir un couple dont les pôles étaient réunis par des fils dont il faisait varier les éléments, longueur, section, nature, et alors il observait que dans tous les cas la quantité de chaleur dégagée restait la même; tantôt il maintenait l'élément de pile dans l'un des calorimètres, et le fil constituant le circuit interpolaire dans un autre calorimètre : il trouvait encore une

somme totale de chaleur dégagée constante, mais différemment distribuée suivant les valeurs relatives des résistances de la pile et du conducteur interpolaire. Dans tous les cas, les expériences confirmèrent les lois que nous avons énoncées précédemment.

Favre vérifia que si le courant est utilisé à produire des électrolyses ou du travail mécanique, on ne retrouve pas la quantité de chaleur correspondante au poids de zinc dissous. La quantité de chaleur qui manque représente, sous une autre forme, le travail produit, l'énergie dépensée à produire un effet différent.

Enfin nous dirons encore, mais sans nous étendre sur ce sujet, que des recherches ont été faites, notamment par Riess, sur le développement de chaleur produit par le passage dans un corps conducteur d'une certaine quantité d'électricité émanant d'une machine électrique ou d'un condensateur, et que les lois auxquelles on est arrivé sont identiques à celles que Joule a données et que nous venons de signaler rapidement.

153. — On sait que les actions chimiques correspondent à des dégagements ou à des absorptions de chaleur; des mesures ont été prises à cet égard, d'abord par Favre et Silbermann, puis plus récemment et plus exactement par M. Berthelot. Puisque dans les piles que nous avons étudiées, le courant est dû à l'action chimique d'une part, et que, d'autre part, il est capable de produire des actions calorifiques, comme nous venons de le dire, il est naturel de rechercher s'il existe une relation entre les quantités de chaleur dont le dégagement correspond aux actions chimiques produites dans les piles et les quantités de chaleur effectivement recueillies soit dans la pile, soit dans le circuit. Favre a étudié cette question et a trouvé que la chaleur recueillie dans le circuit complet est précisément égale à la quantité de chaleur qui aurait été produite par l'action chimique dans la pile s'il n'y avait pas eu production d'un courant électrique, en admettant, bien entendu, que le courant observé n'ait eu à produire extérieurement à la pile ni travail chimique, ni travail mécanique.

154. — Voici quelques chiffres donnés par Favre; ils ne correspondent pas exactement comme forme à l'indication des actions chimiques que nous avons signalées, car ils admettent que l'attaque du zinc correspond à la série d'opérations suivante : Oxydation du zinc par décomposition de l'eau, puis combinaison de l'oxyde de zinc formé avec l'acide sulfurique, tandis que nous avons considéré qu'il y a simplement et directement substitution du zinc à l'hydrogène dans le sulfate d'hydrogène; mais cette différence est sans im-

portance, car il est démontré que, au point de vue thermique, les quantités de chaleur dépendent seulement de l'état initial et de l'état final et sont indépendantes des phases intermédiaires qui ont pu se produire. Nous rappellerons encore que les quantités de chaleur dégagées ou absorbées pour la formation ou la décomposition d'un corps sont égales.

Ceci posé, voici quelques chiffres fournis par les expériences de Favre et Silbermann et correspondant à l'équivalent de chaque corps :

Oxydation du zinc amalgamé		42800 calories
Combinaison du zinc avec l'ac. sulfurique.		10459
Décomposition de l'eau		34450
Décomposition du sulfate de cuivre		29600
Décomposition de l'acide azotique	Bioxyde d'azote et oxygène	6880
	Acide azoteux et oxygène	13650

Nous pouvons dès lors nous rendre compte de la chaleur dégagée dans la pile de Volta ou de Wollaston, alors que 1 équivalent de zinc a été dissous :

Oxydation du zinc amalgamé	42808	53250
Formation du sulfate de zinc	10450	
Décomposition de l'eau		34450
Différence		18800 calories.

Il doit donc rester libres 18 800 calories chaque fois que 1 équivalent de zinc a été dissous dans la pile de Volta.

Dans la pile de Daniell, il y a encore formation de sulfate de zinc, mais c'est du sulfate de cuivre, et non de l'eau, qui est décomposé.

Production du sulfate de zinc	53 250
Décomposition du sulfate de cuivre	29 600
Différence	23 650 calories.

Pour chaque équivalent de zinc dissous dans la pile de Daniell, il doit rester libre une quantité de chaleur représentée par 23 650 calories.

Pour la pile de Bunsen ou de Grove, il importerait de connaître exactement la nature des composés nitreux qui se produisent; suivant qu'il y aura, en effet, production de bioxyde d'azote ou d'acide azoteux, les résultats seront différents :

Production du sulfate de zinc.............	53 250	53 250
Décomposition de l'acide azotique.........	6 880	13 650
Différences...........	46 370	39 600

Suivant que l'une ou l'autre action se produira, il y aura libres 46370 ou 39600 calories pour chaque équivalent de zinc dissous. Si l'on admet que les deux décompositions possibles ont lieu en même temps par parties égales, la quantité de chaleur disponible devra être la moyenne, soit 42985 calories.

Ces résultats ont été vérifiés par Favre, qui a trouvé directement à l'aide du calorimètre à mercure que les quantités totales de chaleur sont bien celles qu'indique cette théorie.

155. — S'il se produit dans le circuit interpolaire des actions électrolytiques ou des actions mécaniques, ainsi que nous l'avons dit, on ne recueille plus autant de chaleur, et la quantité de chaleur disparue correspond au travail mécanique apparu, à l'action chimique manifestée. On conçoit que, à l'aide de ce procédé, Favre ait pu trouver la quantité de chaleur correspondant à un travail mécanique donné, et en conclure l'équivalent mécanique de la chaleur; il obtint par cette méthode le chiffre très approché de 425 kilogrammètres.

Le travail mécanique étant équivalent à la chaleur, proportionnel au nombre de calories correspondant, si W est le travail produit par le courant entre deux points pour lesquels E mesure la différence de potentiel, on aura (151) pour 1 seconde,

$$W = 425\ \mathrm{HEI},$$

ou :

$$W = 425\ \mathrm{H}\lambda \mathrm{I}^2.$$

Il vérifia, d'autre part, que dans le cas d'action chimique, la quantité de chaleur disparue était précisément celle qu'il avait obtenue par des mesures directes comme correspondant à cette action chimique.

156. — On conçoit que puisque toute électrolyse absorbe une certaine quantité de chaleur, déterminée à l'avance, pour chaque équivalent, et que cette action se produit par la combustion de 1 équivalent de zinc dans chaque élément de pile, il faut, pour que l'électrolyse ait lieu, que la pile fournisse pour chaque équivalent de zinc dissous une quantité de chaleur au moins égale à celle qui est absorbée par l'électrolyse. Nous pouvons donc prévoir que la décomposition de l'eau, qui exigerait 34 450 calories, ne pourrait être obtenue par un élément Volta ou un élément Daniell, qui ne donnent

respectivement que 18 800 et 23 650 calories; mais qu'elle pourrait être produite par l'élément Bunsen fournissant en moyenne 42 985 calories. Il n'est pas prouvé, d'ailleurs, que cette décomposition ait lieu, car nous ne savons pas quelle est la fraction de cette chaleur qui subsistera à l'état de chaleur, et celle qui, transformée, donnera naissance à l'action chimique.

157. — Dans la formule trouvée plus haut (151) :

$$Qt = \text{H E } e,$$

donnons à t la valeur qui correspond au temps nécessaire à la dissolution de l'équivalent de zinc : la valeur de e devient alors constante et l'on voit que l'on a :

$$\text{E} = \frac{1}{\text{H}e} Qt,$$

c'est-à-dire que la force électromotrice d'un élément est proportionnelle à la quantité de chaleur produite pendant le temps nécessaire à la dissolution de l'équivalent de zinc, et par suite à celle fournie par cette dissolution même.

Cette conséquence a été vérifiée incidemment par M. J. Regnauld; il a trouvé directement (148), en effet, que les couples de Grove et de Daniell ont des forces électromotrices proportionnelles aux nombres 310 et 179, dont le rapport est 1,731; et, d'autre part, que les quantités de chaleur résultant des actions chimiques dans ces éléments sont comprises (154) entre 46 373 et 39 624 pour la pile de Grove, et 23 653 dans la pile de Daniell. Les rapports entre ces nombres sont :

$$\frac{46373}{23653} = 1{,}961 \text{ ou } \frac{39624}{23653} = 1{,}675,$$

qui comprennent entre eux la valeur précédente 1,731, ce qui correspond à ce fait que les deux actions chimiques qui peuvent se manifester dans l'acide azotique de la pile de Grove se produisent simultanément.

158. — Le passage d'un courant au point de contact ou de soudure de deux métaux différents produit en ce point une variation de température qui, pour deux mêmes corps, change de sens lorsque l'on change la direction du courant; c'est cet effet qui est connu sous le nom de *phénomène Peltier*, du nom du physicien qui l'a découvert. Il importe de remarquer que la température d'un conducteur s'élevant par le fait du passage du courant, on n'observe à la

soudure que la différence entre cet effet et l'effet Peltier ; le résultat final dépend de la grandeur relative de ces effets ; dans certains cas, il y a seulement échauffement moindre pour un sens du courant que pour l'autre : c'est ainsi que lorsque le courant passe du cuivre au fer, au zinc, au plomb ou à l'étain, l'élévation de température est moindre que lorsqu'il marche en sens contraire.

Mais dans quelques cas, il peut y avoir réellement refroidissement de la soudure pour un sens déterminé du courant ; c'est ce qui arrive pour une soudure où le courant passe du bismuth au cuivre, du cuivre à l'antimoine, ou encore du bismuth à l'antimoine. Il est nécessaire de remarquer que l'on ne connaît pas la cause de ce phénomène, et que l'on n'a trouvé aucune condition permettant de prévoir le sens de l'action.

Un effet qui n'est pas sans avoir quelque analogie avec le précédent est désigné sous le nom de *phénomène Thomson :* il consiste en ce que si l'on a un conducteur traversé par un courant dans le sens de A vers B, les parties extérieures à A et B étant maintenues à des températures différentes de celle de la partie comprise entre A et B, l'échauffement n'est pas le même en ces deux points, et la différence entre leurs indications varie quand le courant change de sens. Cette différence dépend aussi d'ailleurs de la nature du métal.

Ajoutons enfin qu'il y a production d'effets analogues à ceux que nous venons de signaler au contact d'une lame métallique et d'une dissolution saline du même métal (Bouty). Ces actions se produiraient également dans les phénomènes d'électrolyse, mais ils sont masqués par d'autres effets.

159. — Des actions électriques peuvent être la conséquence d'effets thermiques, dans des circonstances déterminées. Il semble résulter d'expériences variées et dont les conséquences ne sont pas toutes également simples que lorsque dans un conducteur ou un ensemble de conducteurs il se produit une certaine inégalité dans la propagation de la chaleur, il en résulte une différence déterminée de potentiel entre les extrémités, de telle sorte que si ces extrémités sont reliées par un fil métallique, celui-ci est traversé par un courant dont le sens change avec le changement de sens de cette inégalité : il y a là réciprocité des phénomènes précédemment étudiés.

Dans un fil homogène et de diamètre uniforme, l'échauffement d'une partie déterminée, supposée assez éloignée des extrémités qui sont reliées, par exemple, à un galvanomètre, donne évidemment naissance, de part et d'autre des points chauffés, à une distribution symétrique de la température, à un écoulement symétrique

de la chaleur, et cette symétrie est incompatible avec la production d'un courant, qui a un sens déterminé. Ce ne peut donc être que dans une distribution dissymétrique que l'on a des chances de donner naissance à un courant.

160. — On obtient ce résultat en divisant le conducteur en deux parts, chauffant l'une des extrémités ainsi rendues libres, et maintenant l'autre à la température ordinaire. Au moment où l'on remet en communication les deux bouts du fil et où l'on rétablit ainsi le circuit, il y a production d'un courant qui est d'autant plus fort que la température avait été plus élevée : il est évident que, au moment du contact, la distribution de la chaleur n'est pas la même de part et d'autre du point de réunion. Mais peu à peu l'équilibre de température se produit et la distribution de la chaleur tend à devenir symétrique : on voit, comme conséquence, l'intensité du courant diminuer peu à peu jusqu'à devenir égale à zéro.

Nous devons dire cependant qu'en cherchant à répéter des expériences analogues avec des colonnes mercurielles, certains expérimentateurs, comme Magnus, n'ont pu obtenir de courant; mais d'autres observateurs en ont obtenu et, par suite, nous ne pouvons tirer aucune conclusion de ces dernières expériences.

161. — On a cherché à obtenir la dissymétrie qui est indispensable à la production d'un courant, en opérant sur un conducteur présentant deux sections différentes. En chauffant au point voisin de ce changement, Magnus n'obtint aucun courant : la distribution de la chaleur est évidemment dissymétrique de part et d'autre du point chauffé; mais cette différence coïncide avec une dissymétrie au point de vue de la répartition de la matière, et l'on peut concevoir qu'il y ait là une compensation sinon absolue, du moins assez notable pour rendre presque inappréciable le courant produit. Ajoutons d'ailleurs qu'en réunissant deux fils de platine de diamètres différents et chauffant près du point de jonction, on a pu obtenir un courant.

Enfin on peut arriver à une dissymétrie dans l'écoulement de la chaleur en maintenant à une température constante et assez basse une partie du conducteur voisine de celle que l'on chauffe : il est évident qu'on obtiendra et qu'on maintiendra de part et d'autre du point chauffé une différence dans la distribution des températures. M. Leroux dans ces conditions n'a obtenu aucun courant : en répétant l'expérience avec certaines modifications, nous avons pu mettre en évidence un courant dans un fil de cuivre. Le courant changeait de sens suivant que l'on chauffait une partie située à droite ou à gauche du point refroidi.

Des effets du même genre se produisent lorsque l'on chauffe un conducteur chimiquement homogène, mais dont on a modifié l'état moléculaire par des actions mécaniques; par exemple, un fil de cuivre dont une partie serait recuite tandis que l'autre serait écrouie par le martelage, la torsion, etc. Cette différence moléculaire suffit pour expliquer la dissymétrie de la distribution de la chaleur, et est, à ce qu'il semble, seulement une manière de l'obtenir. Mais il faut dire que, pour quelques auteurs, c'est la différence d'état moléculaire qui est par elle-même la condition de production du courant par la chaleur. Aussi a-t-on admis autrefois que la seule torsion d'un fil en hélice est suffisante pour produire l'écrouissage, même pour le platine, parce que l'on a observé que l'échauffement d'une hélice en platine suffit pour donner naissance à un courant; mais, outre que l'effet persiste même après une opération de recuit, il faut faire observer que M. Gaugain a démontré que le courant ne prend naissance que si deux plis du fil viennent à se toucher, et ne se produit pas si les spires sont bien séparées : comme des parties qui viennent ainsi en contact ne sont pas à la même température, on voit que l'on retombe sur un cas signalé plus haut.

162. — Les courants électriques produits par la chaleur prennent

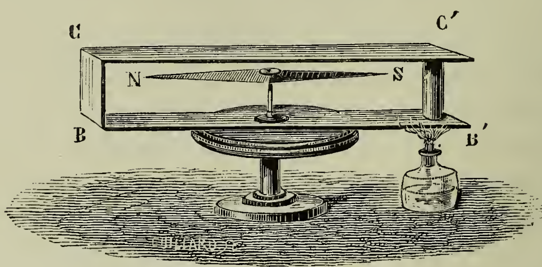


Fig. 90.

surtout naissance lorsque l'on vient à chauffer ou à refroidir la soudure ou la jonction de deux métaux différents : cette action, qui peut être considérée comme la réciproque du phénomène Peltier, est parfaitement d'accord avec l'explication que nous avons donnée d'une dissymétrie dans la distribution de la chaleur, qui ne se répartit pas également dans les deux conducteurs différents. Ce phénomène a été découvert par Seebeck, qui l'a démontré à l'aide d'un circuit CBC′B′ (fig. 90) comprenant du cuivre et de l'antimoine et dans lequel on place une aiguille aimantée NS, en chauffant une sou-

dure; l'aiguille est déviée dans un sens, elle l'est dans l'autre si on chauffe la seconde soudure.

Il va sans dire que si l'on chauffait également les deux soudures, il ne pourrait rien se produire, car on obtiendrait une symétrie complète dans la distribution de la chaleur. Mais la dissymétrie existera, et un courant se produira si l'on refroidit une des soudures, et il sera alors de sens contraire à celui qu'eût donné l'échauffement. En un mot, le courant ne dépend que d'une différence de température maintenue entre les deux branches, et, entre certaines limites, l'intensité est d'autant plus considérable que la différence de température est plus forte.

L'ensemble de deux métaux différents soudés ensemble constitue un *élément thermo-électrique;* si l'on réunit par un fil conducteur les extrémités libres, ce fil sera traversé par un courant lorsqu'il existera une différence de température entre la soudure et les extrémités libres.

Ajoutons que, jusqu'à présent, comme pour le phénomène Peltier, aucune des propriétés physiques ou chimiques des corps en contact ne paraît déterminer le sens du courant qui se produit; mais il y a au contraire une relation intime, la réversibilité, entre la production thermique du courant et le phénomène Peltier. Le courant produit par une élévation de température est de sens contraire de celui qu'il faudrait faire passer dans la soudure pour l'échauffer, et réciproquement. C'est ainsi qu'un courant allant de l'antimoine au bismuth élève la température de la soudure : si alors, d'autre part, dans un circuit, on chauffe une soudure antimoine-bismuth, on obtiendra un courant allant du bismuth à l'antimoine. Nous donnons, du reste, un tableau indiquant quel est le sens de l'action qui se produit lorsque l'on fait varier la température de la soudure de deux métaux. (Tableau V).

163. — On a étudié la variation de l'intensité du courant avec la température pour deux métaux donnés, et l'on a trouvé que dans certaines limites, variables avec la nature des corps en contact, il y a proportionnalité entre l'intensité et la différence de température des soudures. M. Regnauld a reconnu cette proportionnalité entre 0 et 30 pour le couple bismuth-antimoine ; Pouillet l'a observée pour le couple bismuth-cuivre entre — 78° et 100° ; on peut l'admettre de 0 à 350° pour le couple platine-palladium, etc.

Mais on ne peut admettre cette proportionnalité dans tous les cas ; en général même, si l'on élève la température au delà d'une certaine valeur qui dépend de la nature du couple, le courant, après

avoir augmenté d'intensité, décroît peu à peu, et il arrive le plus souvent une température au-dessus de laquelle le courant passe en sens contraire. C'est ainsi que pour un élément zinc-argent dont une soudure est placée dans la glace fondante, le courant augmente d'intensité jusqu'à ce que l'autre soudure ait atteint la température de 120°; si l'on chauffe davantage, le courant diminue et s'annule à 225°, puis au delà il se produit un courant de sens contraire.

164. — Nous avons parlé plus spécialement des courants produits par les variations de température des soudures dans un circuit composé de conducteurs hétérogènes, parce que c'est de cette manière que les actions électriques se manifestent le plus simplement; mais nous pouvons en conclure, et d'ailleurs cela se vérifie directement, que si le circuit n'est pas complet, l'échauffement d'une soudure donne naissance sur les deux corps en contact à une différence de potentiel qui varie avec le couple considéré, mais qui pour un couple donné est constante pour une différence de température donnée et, dans de certaines limites, varie proportionnellement à cette différence de température.

Au lieu de considérer seulement deux métaux dont on maintient la soudure à la température t et les extrémités libres à la température t', on peut imaginer une chaîne composée de ces deux métaux séparés par un nombre quelconque d'autres conducteurs; Becquerel a démontré que la différence de potentiel entre les extrémités de la chaîne serait la même que précédemment, pourvu que les extrémités libres de ces métaux soient maintenues respectivement à la température t', les soudures intermédiaires étant toutes à la température t; c'est-à-dire que la force électromotrice reste la même quelle que soit la nature des soudures intermédiaires.

165. — Comme nous l'avons dit pour la pile de Volta, la différence de potentiel qui résulte de l'échauffement d'une soudure dans un conducteur hétérogène est indépendante de la valeur absolue de ce potentiel.

Il résulte immédiatement de là que l'on peut constituer une pile en réunissant des éléments thermo-électriques dans le même sens, c'est-à-dire en les mettant en communication par les conducteurs différents : la différence de potentiel sur les conducteurs extrêmes sera proportionnelle au nombre des couples et pourra être rendue aussi grande qu'on le voudra. On le reconnaîtrait comme cela a été fait pour la pile de Volta (99).

Pour que cette pile fonctionne il faut évidemment que deux

soudures successives ne soient pas à la même température, et que la différence de température existe tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, c'est-à-dire que la série des soudures impaires, par exemple, soit maintenue à une température plus élevée que les soudures de rang pair. Le plus souvent on s'arrange pour que les soudures de même parité se trouvent placées d'un même côté (fig. 91) : on chauffe alors un des côtés et l'on maintient l'autre à la température ambiante, ou, mieux encore, on la refroidit.

Cette pile, outre qu'elle peut servir de thermomètre différentiel, ainsi qu'il sera dit plus loin, présente au point de vue de l'électricité deux caractères qui peuvent la rendre utile : d'une part, elle peut donner des courants absolument constants si l'on maintient les soudures à des températures invariables, par exemple dans la glace fondante et dans l'eau bouillante ; et d'autre part, étant composée de métaux ou d'autres corps bons conducteurs, elle offre très peu de résistance au passage de l'électricité.

166. — Lorsque la pile doit servir de thermomètre différentiel,

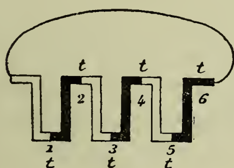


Fig. 91.

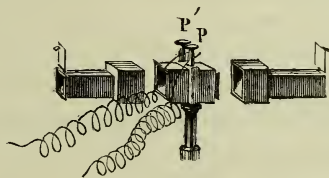


Fig. 92.

on lui donne généralement la forme indiquée par Melloni : elle est alors composée de petits barreaux de bismuth et d'antimoine de 1 millimètre carré de section environ, courbés à angle droit à leurs extrémités et soudés alternativement ; on en dispose ainsi plusieurs à la suite, et l'on a formé la *pile linéaire*, dont les extrémités doivent être reliées à un galvanomètre qui indique, par l'existence du courant, l'existence d'une différence de température entre les deux côtés, et peut même, s'il a été gradué préalablement, mesurer cette différence.

On peut réunir plusieurs rangées semblables de manière à former un ensemble prismatique dont les bases opposées contiennent, l'une les soudures paires, l'autre les soudures impaires ; le tout est placé dans une enveloppe en laiton poli, et les bases sont recouvertes d'écrans de même nature et mobiles à volonté (fig. 92).

Lorsque la pile est destinée à fournir un courant, on peut employer, par exemple, la disposition indiquée par M. Regnauld :

elle est composée de barreaux de bismuth recourbés deux fois à angle droit, placés dans des plans parallèles et dont les extrémités opposées sont reliées d'un barreau à l'autre par des fils de cuivre. Les extrémités des barreaux de bismuth plongent dans des cuves métalliques que l'on remplit d'eau à des températures déterminées, par exemple, l'une de glace fondante, l'autre d'eau bouillante. Le courant reste alors rigoureusement constant et la force électromotrice est proportionnelle au nombre des couples employés.

167. Effets mécaniques produits par les courants. — Des expériences variées montrent qu'il existe, entre deux conducteurs traversés par des courants, des forces qui sont susceptibles de se manifester par la production de mouvements, si l'un au moins des conducteurs est mobile. Ampère a étudié d'une manière complète les actions de ce genre et, en variant les conditions des expériences qu'il a analysées soigneusement, il a pu déterminer la valeur de la force qui agit entre deux éléments de courants situés d'une manière quelconque l'un par rapport à l'autre; l'expérience ne peut reproduire les conditions d'application de cette loi élémentaire, mais elle permet d'étudier ce qui se passe dans diverses circonstances entre deux courants finis ou deux courants dont l'un est infini, entre un courant et un circuit complexe, etc. Nous indiquerons seulement les résultats principaux, ceux qui conduisent à des applications[1].

1. La loi élémentaire d'Ampère est définie comme il suit :

Soient ds et ds' (fig. 93) les longueurs de deux éléments de courant oa, oa' dont les intensités sont respectivement i et i'; r la distance de leurs milieux o et o', α et α'

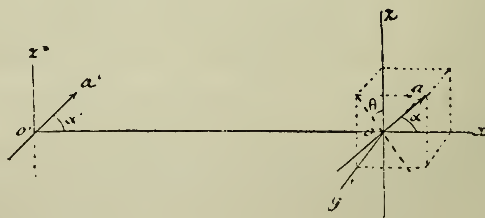


Fig. 93.

les angles que ces courants font avec la ligne qui joint leurs milieux, ces angles étant comptés dans le même sens tant par rapport à cette droite oo' que par rap-

Il importe de remarquer que, dans le cas le plus général, la force peut avoir une direction quelconque et que son action dépend des liaisons du conducteur mobile, de telle sorte que les effets que nous allons signaler sont différents, non par la nature de l'action, mais par la nature du mouvement que peut prendre le conducteur.

Nous n'insistons pas d'ailleurs sur les détails des expériences que les figures font suffisamment comprendre. Il nous suffira de dire que les courants mobiles sont constitués par des fils de cuivre reliés à des traverses en bois équilibrées et posant par une pointe d'acier sur un support : suivant les cas, le courant qui arrive par la colonne métallique servant de support pénètre directement dans le fil par cette pointe, ou passe par un liquide conducteur dans lequel plonge l'extrémité du fil et sort par une cuve analogue. — On peut d'ailleurs renverser à volonté le sens du courant.

168. — On vérifie facilement les règles suivantes :

1° *Deux courants parallèles s'attirent s'ils sont de même sens, ils se repoussent s'ils sont de sens contraire.*

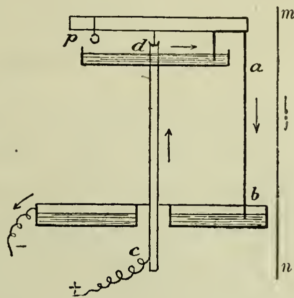


Fig. 94.

On vérifie généralement cette action en prenant un courant fixe mn et un courant ab (fig. 94) mobile autour d'un axe de rotation parallèle à leur direction commune[1]. On peut démontrer que si i et i' sont les intensités des deux courants, l la longueur de l'un d'eux, l'autre étant infiniment long (le fixe, naturellement) et D la distance, la force qui agit est donnée par la formule :

$$f = ii' \frac{l}{D}$$

port à la direction des courants, et soit θ l'angle des plans déterminés respectivement par cette droite et par chacun des éléments. Si alors on désigne par f la force qui agit, cette force, dirigée suivant la ligne oo', est donnée par la relation :

$$f = \frac{ii'\, ds\, ds'}{r^2} \left(\cos\theta \sin\alpha \sin\alpha' - \frac{1}{2} \cos\alpha \cos\alpha' \right).$$

Si l'on désigne par φ l'angle des deux éléments dans l'espace, on peut remplacer cette formule par la suivante :

$$f = \frac{ii'\, ds\, ds'}{r^2} \left(\cos\varphi - \frac{3}{2} \cos\alpha \cos\alpha' \right).$$

1. Dans les figures se rapportant aux effets mécaniques, le sens du courant sera indiqué par des flèches simples et celui des forces par des flèches barbelées.

Il est clair que deux courants très voisins, parallèles et de sens contraire *nm*, *mn'* (fig. 95), constituent un ensemble sans action sur un autre courant parallèle, car ils produisent deux actions égales et contraires qui se détruisent.

L'expérience prouve, ce qui n'était pas évident à priori, qu'il y a encore équilibre si l'on considère deux courants de sens contraires



Fig. 95.

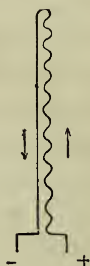


Fig. 96.

dont l'un soit sinueux, tout en s'écartant très peu de l'autre (fig. 96). On en conclut, par conséquent, que, inversement, un courant rectiligne pourrait être remplacé dans son action par un courant sinueux s'en écartant très peu.

Si l'on a deux courants situés dans un même plan, formant un angle et tels que le courant mobile ne puisse que tourner autour du point d'intersection, ou deux courants faisant un angle dans l'espace et tels que le courant mobile ne puisse que tourner autour de la perpendiculaire commune aux deux directions, de manière à détruire dans l'un et l'autre cas les composantes qui ne seraient pas perpendiculaires au courant mobile, on observe des mouvements qui peuvent être prévus à l'aide de l'énoncé suivant :

2° *Deux courants angulaires s'attirent s'ils se dirigent ensemble*

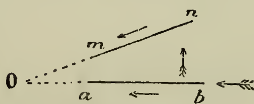


Fig. 97.

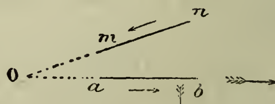


Fig. 98.

vers le sommet de l'angle (fig. 97), *ou s'ils s'en éloignent ensemble; ils se repoussent dans le cas contraire* (fig. 98).

Dans les deux cas, le courant mobile *ab* obéissant à cette action arrive à l'état d'équilibre dans lequel les deux courants sont alors parallèles et de même sens.

Il est à remarquer que, dans ce cas, il existe en même temps une force parallèle à la direction du courant mobile : cette force tend à éloigner le conducteur mobile du sommet si l'un des courants se dirige vers le sommet, tandis que l'autre s'en éloigne ; elle aurait au contraire pour effet de le rapprocher de ce point, si les deux courants s'approchaient ensemble ou s'éloignaient ensemble du sommet de l'angle.

On reconnaît facilement que cette force parallèle disparaît si l'on a un courant fixe indéfini *mn* (fig. 99) agissant sur un courant angulaire fini *ab*; il y a alors deux composantes de sens contraires dirigées parallèlement à *ab*.

169. — Nous avons supposé que les deux courants ne dépassaient

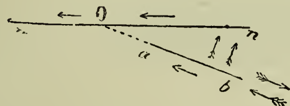


Fig. 99.

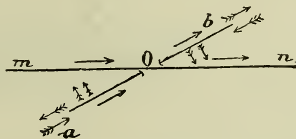


Fig. 100.

pas ensemble le sommet de l'angle O (ou la perpendiculaire commune), ou même qu'ils ne l'atteignaient pas. Il est facile de reconnaître que si l'on a deux courants *croisés ab* et *mn* (fig. 100), il y a quatre actions perpendiculaires qui sont toutes concourantes et qui tendent à amener le courant mobile à être parallèle au courant fixe et de même sens.

Il va sans dire que, dans ce cas, il n'y a pas de forces parallèles, les diverses composantes se détruisant deux à deux.

170. — Considérons le cas simple où l'on a un courant indéfini

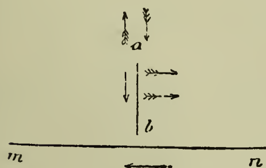


Fig. 101.

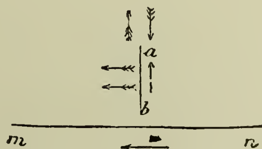


Fig. 102.

mn (fig. 101 et 102) agissant sur un courant mobile perpendiculaire *ab* absolument libre, ou susceptible de se mouvoir parallèlement à sa direction. On reconnaît immédiatement qu'il n'existe que des composantes perpendiculaires qui s'ajoutent et qui provoquent le

mouvement du conducteur mobile parallèlement à sa direction dans le sens qu'indiquent les figures.

L'action serait analogue si le courant mobile perpendiculaire au courant fixe n'était pas dans un même plan avec lui.

On se rend compte, à l'aide de considérations tout à fait semblables aux précédentes, de la rotation provoquée par un courant circulaire

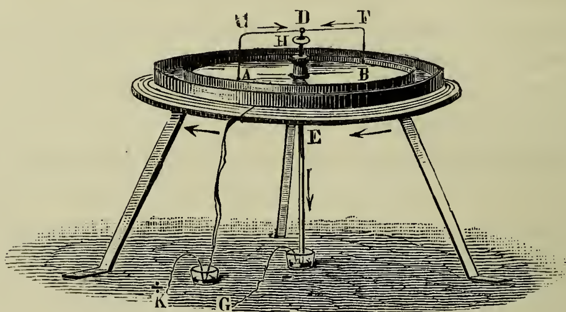


Fig. 103.

sur un courant mobile autour de l'axe du cercle (fig. 103). Le circuit mobile est entraîné dans le sens du courant fixe s'il est parcouru par un courant qui s'éloigne de celui-ci; il est entraîné en sens contraire du courant fixe s'il est parcouru par un courant qui s'approche de celui-ci.

171. — Il est facile de prévoir ce qui doit arriver lorsque l'on a un courant fixe agissant sur un circuit mobile fermé : nous examinerons successivement le cas où le circuit est mobile autour d'un axe parallèle au courant fixe, et celui où il est mobile autour d'un axe perpendiculaire à ce courant fixe.

1° Soit un courant rectangulaire *abcd* (fig. 104) mobile autour

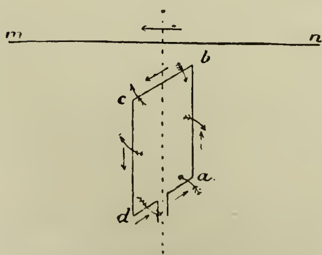


Fig. 104.

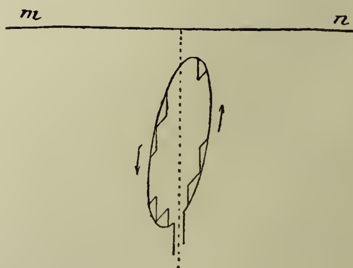


Fig. 105.

d'un axe perpendiculaire au courant fixe *mn*. En s'appuyant sur les

résultats indiqués plus haut (168, 170), on reconnaît facilement que les trois actions produites sur *ab*, *bc* et *cd* sont concordantes, tandis que la partie *da* produit un effet inverse. Mais il est à remarquer que l'action de *da* est moindre que celle de *bc* à cause de la plus grande distance, de telle sorte que le mouvement produit est celui provenant des actions de *ab*, *bc* et *cd*, c'est-à-dire qu'il a pour effet d'amener le circuit de manière que dans sa partie la plus rapprochée du courant fixe le courant soit parallèle à celui-ci et de même sens.

Si le courant n'est pas rectangulaire (fig. 105), on peut remplacer par la pensée chaque élément du circuit par un circuit sinueux comprenant une partie perpendiculaire au courant fixe et une partie parallèle. Tous les éléments composants perpendiculaires produisent des actions concordantes avec celle des éléments parallèles de la partie supérieure, de manière que dans la partie la plus rapprochée le courant tende à être de même sens que dans le courant fixe; les éléments parallèles de la partie inférieure qui agissent en sens contraire produisent des effets moindres, à cause de la plus grande distance, et ce sont par suite les autres composantes qui déterminent le mouvement.

2° Soit maintenant un courant rectangulaire *abcd* (fig. 106) mobile autour d'un axe parallèle au courant fixe *mn* : quelles que

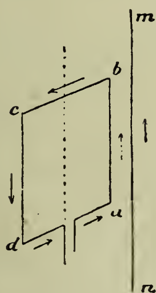


Fig. 106.

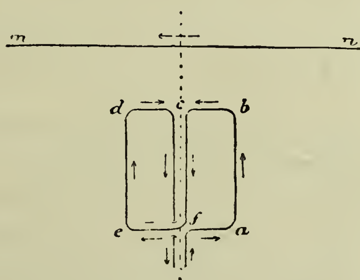


Fig. 107.

puissent être les actions exercées en *bc* et en *da*, elles se détruisent ; les actions en *cd* et en *ab* sont concordantes et ont pour effet de rapprocher le plus possible du courant fixe la partie du circuit mobile où le courant est de même sens.

On passe d'ailleurs facilement de ce cas à celui d'un circuit mobile de forme quelconque et l'on arrive à un résultat analogue.

On peut dès lors parvenir par des combinaisons diverses à imaginer des circuits mobiles qui soient insensibles à l'action d'un courant fixe donné, qui soit *astatique* par rapport à ce courant (fig. 107).

172. — Ampère a particulièrement étudié des combinaisons de courants fort intéressantes, les *solénoïdes*. Théoriquement un solénoïde (fig. 108) est un assemblage de courants circulaires parallèles et de même sens : le lieu des centres de ces cercles est l'*axe* du

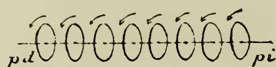


Fig. 108.

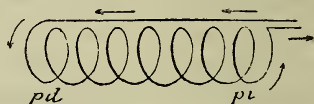


Fig. 109.

solénoïde. Dans la pratique, on construit un solénoïde à l'aide d'un fil enroulé en hélice (fig. 109) et dont on ramène une partie parallèlement à l'axe dans toute sa longueur : chaque spire peut être supposée remplacée par un courant circulaire et un élément rectiligne de longueur égale au pas de l'hélice (fig. 110) ; l'action de cet élément est détruite par l'action inverse du fil de retour et il n'y a à considérer que les parties circulaires.

Il n'y a pas lieu de distinguer, comme on le faisait autrefois, les solénoïdes *dextrorsum* des solénoïdes *sinistrorsum;* mais, par contre, il faut insister sur ce que dans un solénoïde les extrémités

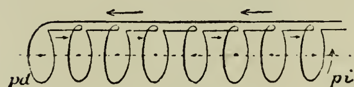


Fig. 110.

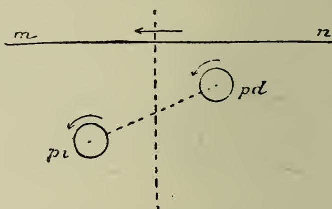


Fig. 111.

sont différentes : dans l'une on voit le courant tourner dans le sens des aiguilles d'une montre, tandis que dans l'autre on le voit tourner en sens opposé : nous désignerons la première extrémité sous le nom de *pôle direct* et la seconde sous celui de *pôle inverse*.

173. — Étant donné un solénoïde placé dans le voisinage d'un courant assez intense et pouvant tourner autour d'une perpendiculaire à son axe (fig. 111), on conçoit que chaque courant circulaire subisse l'action du courant et que, par suite, le solénoïde se dirige jusqu'à ce que dans la partie la plus voisine les courants qui le traversent soient parallèles au courant fixe. Alors, l'axe du solénoïde est perpendiculaire au courant fixe, et l'on voit facilement que si

l'on personnifie le courant comme il a été dit ci-dessus (104), on peut dire que le pôle *inverse* du solénoïde au moment de l'équilibre est à gauche du courant.

174. — L'application de la formule élémentaire (167) permet d'étudier l'action résultante exercée par l'ensemble des spires d'un solénoïde sur un élément de courant (fig. 112) ; on trouve que cette force, dont nous ne donnerons pas la valeur, est dirigée perpendiculairement au plan qui contient l'élément de courant et l'extrémité de l'axe du solénoïde, et son sens est tel que l'élément de courant soit entraîné vers la gauche de l'observateur qui personnifie le courant s'il regarde le pôle du solénoïde dans le cas où celui-ci est un pôle direct, et que l'élément de courant soit entraîné vers la droite s'il s'agit d'un pôle inverse.

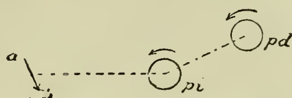


Fig. 112.

Comme conséquence, le pôle du solénoïde subit de la part de l'élément de courant une action égale et contraire, c'est-à-dire qu'il est soumis à une force perpendiculaire au plan passant par l'élément de courant et le pôle, dirigée de manière que le pôle soit entraîné à droite du courant s'il s'agit d'un pôle direct, et à gauche s'il s'agit d'un pôle inverse.

Ajoutons, sans y insister, que l'on a pu déterminer par le calcul l'action d'un solénoïde sur un courant donné, fini ou infini, dans des circonstances connues : ces résultats ont été vérifiés par l'expérience.

175. — Si l'on considère deux solénoïdes, dont l'un soit mobile autour d'une droite perpendiculaire à son axe, et dont on approche les extrémités, on reconnaît qu'il y a attraction si les pôles en présence sont de noms contraires et qu'il y a répulsion si les pôles sont de même nom. Nous n'avons pas besoin d'insister sur l'analogie que présente ce phénomène avec les effets observés dans les aimants.

176. — L'expérience montre qu'un circuit très mobile traversé par un courant suffisamment intense prend en général une direction déterminée qui se renverse absolument si l'on change le sens de ce courant. On peut résumer les effets observés en disant que tout se passe comme s'il existait dans les régions équatoriales un courant qui se dirigeât sensiblement de l'est à l'ouest. Cela explique entre autres les effets suivants :

Un circuit fermé mobile autour d'un axe vertical se dirige de manière à se placer perpendiculairement au méridien magnétique

et de telle sorte que le courant ascendant soit à l'ouest ; il résulte de là que, vu du pôle nord, le sens de la rotation est inverse.

Si l'on prend un circuit fermé mobile autour d'un axe horizontal perpendiculaire au méridien magnétique, il s'incline de manière que la partie inférieure dirigée vers le sud soit traversée par un courant de l'est à l'ouest. Le plan du circuit est alors perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison.

Dans l'hémisphère austral on observerait des effets analogues, *mutatis mutandis*.

Il est aisé de prévoir que les phénomènes observés seront plus intenses si l'on prend plusieurs circuits parallèles au lieu d'un seul, mais que les résultats seront les mêmes ; par conséquent un solénoïde mobile autour d'un axe horizontal prendra une position telle que son axe sera dans le plan du méridien magnétique et que le pôle dirigé vers le nord sera ce que nous avons appelé le pôle inverse qui pourra dès lors recevoir le nom de *pôle nord*.

D'autre part, si l'on a un solénoïde mobile autour d'un axe horizontal et perpendiculaire au plan du méridien magnétique, il se dirige de manière que son axe soit parallèle à l'aiguille d'inclinaison.

177. — Les actions des solénoïdes entre eux et la direction qu'ils prennent spontanément sont en tout semblables aux actions observées sur les aimants : aussi paraît-il tout naturel d'établir une analogie qu'Ampère a su reconnaître dans ses mémorables recherches. Cette analogie ne consiste pas seulement dans un parallélisme des actions, pour ainsi dire, mais elle peut être poussée beaucoup plus loin, car il existe des actions réciproques des courants ou des solénoïdes et des aimants. Il nous suffira de les indiquer rapidement.

Une aiguille placée dans le voisinage d'un courant (fig. 113 et 114) tend à se diriger perpendiculairement au courant, de telle sorte que le pôle nord soit à la gauche de celui-ci (104) quelles que soient les

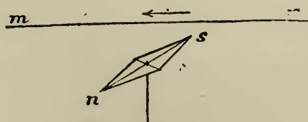


Fig. 113.

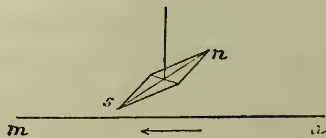


Fig. 114.

positions relatives du courant et de l'aiguille (expérience fondamentale d'Œrsted et règle d'Ampère).

Il va sans dire que si le courant est mobile et l'aimant fixe, c'est le courant qui est dévié, mais la position finale relative est la même.

Un solénoïde agit sur un aimant lorsqu'on présente leurs extrémités en regard : il y a attraction s'il s'agit de pôles de noms contraires ; et répulsion si les pôles sont de même nom.

On peut donc entièrement assimiler comme action électrique ou magnétique un aimant à un solénoïde, le pôle nord de l'un étant homologue du pôle nord de l'autre, c'est-à-dire qu'un aimant est un solénoïde et que son pôle nord est un pôle inverse.

La seule différence observée, c'est que, tandis que l'action exercée sur un pôle d'un solénoïde est appliquée à l'extrémité de l'axe, dans l'aimant les actions analogues sont appliquées en un point, le pôle, qui n'est pas à l'extrémité même, mais à une petite distance. Ampère a cependant maintenu l'assimilation ; l'aimant est considéré par lui comme un assemblage de solénoïdes *particulaires* semblablement orientés ; mais il admet que les axes, par réaction réciproque, subissent certaines déviations de telle sorte que les extrémités ne sont pas toutes dans le plan extrême et que le point d'application de la résultante des forces élémentaires correspondant à ces solénoïdes partiels ne peut dès lors être dans ce plan.

Un aimant avec un point conséquent serait, dans cette théorie, analogue à un assemblage de courants circulaires, tels que dans un certain nombre d'entre eux le courant marcherait dans un sens tandis qu'il marcherait en sens contraire dans les autres.

Enfin un morceau de fer doux posséderait de semblables courants particulaires, mais non orientés et dont par suite les effets se détruiraient : l'action d'un aimant serait de les orienter semblablement à lui, et cela explique l'aimantation par influence ; ils reprendraient leurs positions quelconques si l'aimant était enlevé et le fer doux cesserait d'être aimanté au moins à peu près (magnétisme rémanent).

Cette idée conduisit Ampère à supposer qu'un solénoïde agit dans ce cas également pour aimanter le fer doux, et l'amena à construire les *électro-aimants*. Un électro-aimant est un barreau de fer doux entouré d'un solénoïde : il devient un aimant lorsque le courant passe, et cesse d'être aimanté, du moins à peu près complètement, dès que le courant est interrompu.

Si l'on opère sur un barreau d'acier, dans l'un et l'autre cas les courants particulaires semblent avoir plus de difficulté à s'orienter ; mais ils conservent l'orientation après la cessation de l'action directrice et le barreau reste aimanté.

178. — Les lois qui régissent l'action d'un aimant sur un élément de courant sont les mêmes que celles que nous avons indiquées en parlant des solénoïdes, et les vérifications expérimentales ont montré dans tous les cas un accord parfait.

Naturellement aussi les conséquences que l'on en peut tirer pour le cas de courants finis, de circuits fermés, etc., sont vraies aussi, et l'on a pu expliquer ainsi un certain nombre d'effets qui paraissaient bizarres au premier abord et qui sont cependant en concordance avec les lois élémentaires.

Des effets très complexes relatifs aux actions des courants, tant sur les solénoïdes que sur les aimants, ont pu être prévus par le calcul en prenant pour base la formule d'Ampère, et l'on a pu réaliser et vérifier expérimentalement toutes les conséquences auxquelles on est ainsi arrivé : nous ne pouvons insister ici et nous devons nous borner à signaler d'une manière générale cette concordance absolue.

179. — Les divers résultats que nous avons signalés rapidement au sujet de l'influence des courants de formes diverses sur les aimants ou réciproquement peuvent s'exprimer d'une façon différente.

On peut, par exemple, dire que l'existence d'un circuit traversé par un courant donne naissance à un *champ magnétique* (19) dont les lignes de force peuvent être mises en évidence par des expériences analogues à celle du spectre magnétique (12). Ce champ magnétique détermine dès lors les mouvemements des aimants qui s'y trouvent placés conformément aux indications générales. S'il existait primitivement un champ magnétique, il est modifié dans sa constitution par l'existence d'un courant.

D'autre part, les courants mobiles sont, comme les aimants, influencés par la constitution du champ magnétique où on les introduit et, comme les aimants, sont dirigés par rapport aux lignes de force, quoique les règles ne soient pas les mêmes.

Il est inutile d'insister sur cette façon de présenter les phénomènes indiqués précédemment, car elle ne change rien aux faits et modifie seulement la forme des énoncés.

180. Courants électriques produits par des actions mécaniques. — Nous avons vu que l'action d'un courant ou d'un aimant sur un conducteur traversé par un courant donnait naissance à un mouvement relatif : nous allons étudier maintenant des effets que l'on peut considérer comme inverses de ceux-ci.

Le phénomène initial est le suivant : soit un conducteur AB (fig. 115) traversé par un courant et soit un circuit CDG : quel que soit leur

rapprochement, le voisinage de AB n'amènera aucun effet dans CD; mais sitôt qu'il y aura un déplacement relatif, il naîtra un courant dans CD et ce courant durera autant que le déplacement même, pour cesser lorsque la distance sera redevenue invariable, quelle que soit sa valeur. Le courant dans CD sera de sens contraire à celui de AB, c'est-à-dire *inverse*, s'il y a rapprochement; il y aura au contraire un courant de même sens ou *direct*, s'il y a éloignement : ces courants sont appelés *courants induits*.

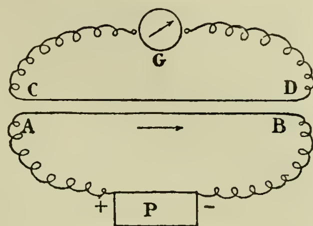


Fig. 115.

L'intensité du courant produit croît avec la longueur des fils en présence, avec l'intensité du courant inducteur, et avec la rapidité du déplacement relatif.

181. — Il importe de remarquer que le courant induit qui naît ainsi et le courant inducteur agissent l'un sur l'autre conformément aux règles énoncées plus haut; que, par exemple, lors du rapprochement, le courant induit étant de sens contraire au courant inducteur, il existe une force répulsive, c'est-à-dire une force qui s'oppose au mouvement existant : l'effet est inverse dans le cas de l'éloignement. C'est cette remarque qui constitue la *loi de Lenz*.

Lors du déplacement relatif d'un courant et d'un circuit, les courants qui prennent naissance dans celui-ci font naître des forces qui s'opposent au mouvement qui les produit.

Il faut remarquer que des résultats analogues se manifestent également dans les autres circonstances où naissent les courants. Les actions chimiques des piles hydro-électriques amènent la polarisation des électrodes; les courants qui prennent naissance dans les piles thermo-électriques ont pour effet de faire varier la température de la soudure (phénomène Peltier) en sens contraire de l'action thermique qui lui est effectivement appliquée.

182. — Afin d'observer des effets plus intenses, on a d'abord remplacé les fils rectilignes par des fils enroulés en spirale, augmentant ainsi la longueur agissante; on emploie de préférence maintenant des bobines : en-

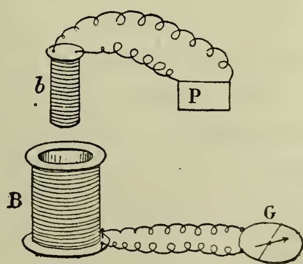


Fig. 116.

général, le courant inducteur passe dans une bobine *b* (fig. 116) que l'on peut introduire dans une bobine creuse d'un plus grand diamètre, *bobine induite* B. Il va sans dire que dans chaque bobine le sens de l'enroulement doit être le même.

On peut prévoir et l'expérience justifie qu'un aimant, que nous comparons à un solénoïde, doit donner naissance à des effets analogues. Si, en effet, on introduit dans une bobine un barreau aimanté ou si on l'en retire, on observe la production de courants induits ; et dans chaque cas, le sens du courant est bien celui que l'on déterminerait en appliquant les règles données ci-dessus au solénoïde qui remplacerait l'aimant.

Des effets du même genre peuvent être observés sans qu'il y ait déplacement relatif, à proprement parler, dans les conditions suivantes.

183. — Si l'on a deux circuits, deux bobines par exemple B et *b* (fig. 117), et que dans l'une d'elles *b* on fasse passer un courant, il se produira dans B un courant de très courte durée et de sens inverse : c'est le *courant induit de fermeture*. Il correspond à la période d'état variable (108) du courant inducteur, et cesse dès que le courant atteint l'état permanent. Si l'on vient à rompre le circuit dont fait partie la bobine *b*, il y a manifestation d'un courant en B, courant direct qui est appelé *courant induit de rupture* et qui correspond également à la période d'état variable.

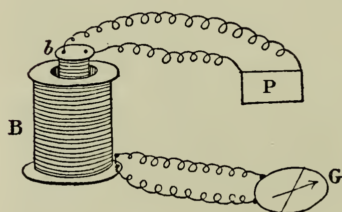


Fig. 117.

On peut, dans une certaine mesure, rapprocher ces effets des précédents, en remarquant qu'un courant qui commence peut être comparé à un courant qui arrive instantanément de l'infini, et inversement pour un courant qui finit.

184. — Enfin des effets analogues sont produits par des variations d'intensité du courant inducteur (ce que l'on obtient facilement en faisant varier les résistances dans le circuit) : un courant qui augmente d'intensité donne naissance à un courant induit inverse ; on peut dire qu'il y a là commencement d'un courant surajouté au courant primitif et égal à la valeur de l'augmentation. Si le courant inducteur diminue d'intensité, il y a production d'un courant induit direct. Ces courants n'ont d'ailleurs que la durée de la période d'état variable du courant inducteur.

185. — Les deux derniers modes de production des courants induits se manifestent également sous l'influence des aimants. On le prouve comme suit :

Dans une bobine (fig. 118) on place un long barreau de fer doux de l'extrémité libre *s* duquel on approche brusquement un aimant NS ; il y a immédiatement production d'un courant dans la bobine, et le sens de ce courant est bien celui qui correspondrait à l'action du solénoïde qui peut remplacer l'aimant, d'après Ampère ; il y a un courant inverse lorsque l'on éloigne rapidement l'aimant. Dans ce cas, il y a commencement d'un aimant (le fer doux s'aimantant par influence), puis cessation de cet aimant : on peut reconnaître que c'est bien le développement et la cessation du magnétisme qui produisent l'induction et non le mouvement de l'aimant qu'on approche ou qu'on éloigne, en recommençant la même expérience après avoir remplacé le barreau de fer doux par un morceau de bois de

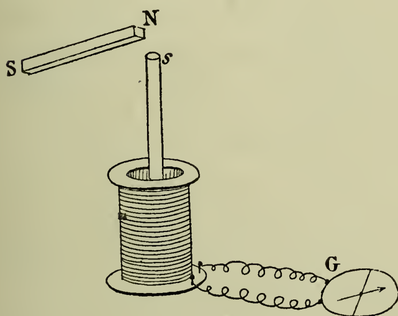


Fig. 118.

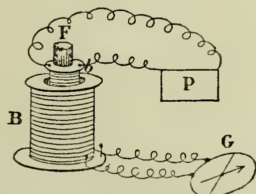


Fig. 119.

même dimension ; le courant induit qui se manifeste alors est très faible et ne peut se comparer à celui que l'on observe dans l'expérience précédente, bien que les variations de distance de l'aimant soient les mêmes.

On montre également l'effet produit par une augmentation ou une diminution d'intensité magnétique au moyen d'une expérience semblable mais dans laquelle le barreau de fer doux est remplacé par un aimant : le rapprochement ou l'éloignement d'un autre aimant a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'intensité magnétique de chaque pôle du premier, suivant les noms des pôles qui sont ainsi mis en présence.

186. — Si l'on répète l'expérience de la production d'un courant par un courant à l'aide de deux bobines en mettant un fer doux F (ou mieux un faisceau de fil de fer doux) à l'intérieur de la bobine interne *b* (fig. 119), on reconnaît que l'intensité du courant induit est

notablement augmentée. Ce résultat s'explique facilement en remarquant que le fer doux s'aimante par l'action du courant inducteur et cesse d'être aimanté lorsque le courant inducteur est interrompu : il y a donc, en même temps, un courant et un aimant qui commencent, un courant et un aimant qui finissent, et on voit immédiatement que l'action de l'aimant s'ajoute à celle du courant, cequi explique l'augmentation d'intensité du courant inducteur.

187. — Considérons une bobine dans laquelle on fait passer un courant : au moment où on l'établit, quelle que soit la rapidité de l'effet, il n'est pas instantané et le courant existe dans une spire ABC (fig. 120) un instant avant d'exister dans la spire suivante CDE : il doit donc y avoir induction de chaque spire sur les voisines et,

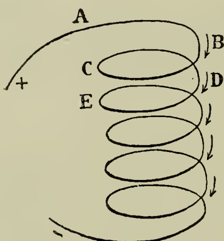


Fig. 120.

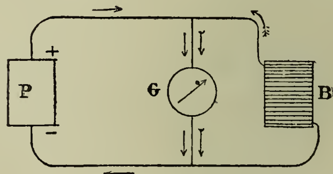


Fig. 121.

par suite, manifestation d'une force électromotrice qui, si elle existait seule, produirait un courant inverse; mais qui, en réalité, ne peut qu'affaiblir le courant principal et changer la forme de l'état variable. On peut mettre en évidence l'existence de cette force électromotrice et du courant auquel elle donne naissance (courant qui a reçu le nom d'*extra-courant de fermeture*) à l'aide de l'expérience suivante :

Dans un circuit comprenant une pile P (fig. 121) et une bobine B on introduit une dérivation comprenant un galvanomètre G. On note la déviation produite par le passage du courant et on arrête l'aiguille à ce point par un taquet qui l'empêche de revenir au zéro, puis on rompt le circuit. Au moment où on le rétablit, l'aiguille, vivement déplacée, indique une déviation plus grande du galvanomètre : donc, à la force électromotrice de la pile s'est ajoutée une autre force électromotrice qui ne peut provenir que de la bobine et qui, ayant dans la dérivation une action de même sens que celle de la pile, a nécessairement dans le circuit une action de sens inverse, ce qu'il s'agissait de démontrer.

188. — Un effet inverse se manifestera nécessairement à la rupture

d'un circuit présentant des parties voisines, comme une bobine, et il y aura production d'une force électromotrice donnant naissance à un courant de même sens que le courant principal et qui se manifestera par une augmentation brusque de celui-ci avant sa cessation. On peut reconnaître cet effet à l'aide d'un galvanomètre placé dans un circuit comprenant une bobine : au moment où l'on rompt le circuit, l'aiguille qui était déviée s'écarte davantage du zéro, dénotant ainsi l'existence d'un *extra-courant de rupture*. On peut mettre plus nettement le fait en évidence à l'aide d'une expérience analogue à celle indiquée précédemment : le courant d'une pile P (fig. 122) passant dans le circuit, bobine et dérivation, l'aiguille du galvanomètre G est déviée. On la ramène au zéro malgré le courant et on l'y maintient à l'aide d'un taquet ; au moment de la rupture du circuit l'aiguille se trouve brusquement déviée en sens contraire : il y a donc eu production d'une force électromotrice, qui ne peut provenir que de la bobine et qui, ayant dans la déviation une action inverse de celle de la pile, a nécessairement dans le circuit, c'est-à-dire dans la bobine, une action de même sens que celle de la pile.

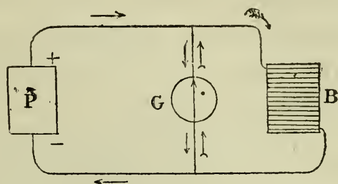


Fig. 122.

189. — La terre peut être considérée soit comme un aimant, soit comme un solénoïde ; il résulte de là qu'il doit être possible de mettre en évidence l'existence de courants d'induction produits sous son influence. C'est en effet ce qui a été vérifié par divers savants et ce que l'on peut montrer à l'aide du cerceau de Delezenne ; cet appareil est constitué par un cadre circulaire en bois, entouré de plusieurs spires d'un fil métallique recouvert d'une matière isolante et dont les extrémités sont en relation constante avec deux conducteurs auxquels communiquent deux bornes ; ce cadre tourne autour d'un axe de rotation dont on peut faire varier à volonté la direction et l'inclinaison. En introduisant un galvanomètre dans le circuit et faisant tourner le cadre, on reconnaît l'existence d'un courant d'induction, au moins toutes les fois que l'axe de rotation n'est pas parallèle à l'aiguille d'inclinaison : le sens du courant est conforme d'ailleurs aux lois de l'induction et à l'hypothèse du courant équatorial de l'est à l'ouest (176).

190. Il est essentiel de faire observer qu'un courant induit ne diffère pas, au fond, de tout autre courant ayant une origine dif-

férente, action chimique ou calorifique, bien que les manifestations soient diverses. Il est de même nature, bien qu'il se présente avec des caractères différents.

Ainsi qu'il était facile de le prévoir, et comme il a d'ailleurs été vérifié par l'expérience, le courant induit ne naît pas *instantanément* d'une manière absolue, pas plus qu'il ne finit brusquement; mais, comme tout courant électrique, il présente une période d'état variable d'établissement et une période d'état variable de cessation : seulement ces périodes, très courtes l'une et l'autre, se succèdent très rapidement, de telle sorte qu'il n'y a pas, à proprement parler, d'état permanent.

L'absence d'une période appréciable d'état permanent, la rapidité de succession des deux états variables initial et final peuvent masquer les effets résultant de l'existence des courants induits sans que l'identité des causes puisse être niée. Comme nous le dirons d'ailleurs, on peut, à l'aide des courants obtenus par induction, donner naissance à des effets chimiques, à des effets calorifiques, à des effets mécaniques; les courants d'induction peuvent enfin, conformément aux lois que nous venons d'indiquer, faire naître dans des circuits voisins des courants d'induction.

Ajoutons, d'autre part, que les différences de potentiel, dont l'existence des courants induits est une preuve, sont assez considérables pour donner lieu à des effets de décharge qui sont identiques à ceux que peuvent donner les machines électriques.

Nous avons dit (183) que les courants induits produits correspondent à une période d'état variable du courant inducteur : on peut donc prévoir qu'un courant induit pourra agir à son tour sur un circuit voisin pour y faire naître deux courants, correspondant aux deux périodes d'état variable initial et d'état variable final. Le sens de ces courants est également prévu par les règles générales données précédemment, et les effets peuvent être résumés par le tableau suivant qui fait connaître le sens de ces nouveaux courants dits *courants induits de deuxième ordre*.

Courant inducteur	Fermeture Etat variable.	— État permanent.	Rupture État variable	
Courant induit de 1er ordre	Courant inverse. Établisst-Cessation	Rien	Courant direct. Établisst-Cessation.	
Courant induit de 2e ordre	Courant direct	Courant inverse	Courant inverse.	Courant direct.

Le sens des courants de deuxième ordre est donné par rapport au sens du courant inducteur.

Ces actions se comprennent facilement aussi à l'aide du tracé graphique ci-joint (fig. 123).

On a pu mettre en évidence l'existence des courants induits du deuxième ordre à l'aide de la disposition suivante :

Un circuit A contient une pile et une bobine (ou une spirale) B;

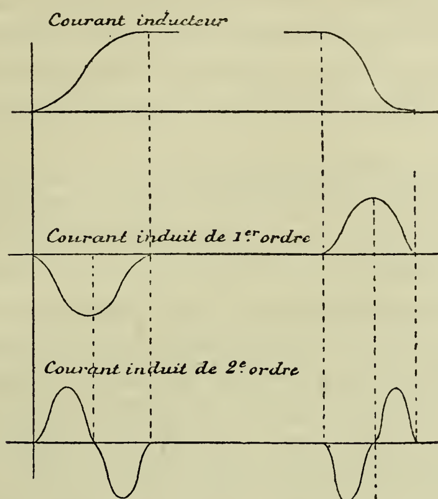


Fig. 123.

celle-ci agit sur une bobine b_1 qui fait partie d'un circuit comprenant une seconde bobine b_1', laquelle est placée dans le voisinage d'une bobine b_2 appartenant à un circuit dans lequel se trouvera l'appareil particulier C destiné à mettre en évidence les courants que l'on veut étudier.

La fermeture (ou la rupture) du circuit AB fera naître un courant induit de premier ordre dans le circuit $b_1 b_1'$, et celui-ci donnera naissance à deux courants induits de deuxième ordre dans le circuit b_2 C.

Nous n'insisterons pas sur les dispositions qu'il convient d'employer pour mettre en évidence l'existence de ces courants induits de deuxième ordre, il y a quelques difficultés, eu égard à la succession très rapide de deux courants de courte durée et de sens contraire.

On comprend facilement que ces courants induits de deuxième ordre agissant sur un circuit voisin y produisent des courants induits de troisième ordre et ainsi de suite; mais le nombre de ces courants sera double du nombre des courants d'ordre inférieur, etc.

Les courants induits d'ordre supérieur au premier sont absolu-

ment sans application jusqu'à présent et il est inutile d'insister davantage.

191. — En étudiant les effets produits lors de la manifestation de courants induits dans diverses circonstances, on est arrivé à des lois qu'il est important de connaître.

Toutes choses égales d'ailleurs, et ainsi qu'il est facile de le prévoir, l'intensité du courant induit varie avec celle du courant inducteur (il va sans dire que ce que nous indiquons pour le courant s'applique aux aimants), et avec la longueur du circuit inducteur.

La quantité d'électricité dégagée dans le circuit induit ne dépend que du déplacement relatif du courant (ou de l'aimant) inducteur; ou bien de la grandeur de la variation d'intensité du courant (ou de l'aimant) inducteur.

Mais la différence de potentiel, et par suite l'intensité du courant pour un circuit donné, varie en raison inverse du temps pendant lequel s'est produit le déplacement ou pendant lequel s'est manifestée la variation d'intensité. Ce résultat se comprend, car une quantité d'électricité donnée produit un courant d'autant plus intense que le temps pendant lequel l'écoulement a lieu est plus court.

Certains effets dépendent des quantités d'électricité (électrolyse), d'autres de l'intensité du courant (galvanomètre); pour le même déplacement relatif de deux circuits, les premiers effets seront indépendants de la vitesse de ce déplacement, tandis que les autres en dépendront directement.

Comme conséquence immédiate, il résulte de là que si on donne naissance successivement à deux déplacements inverses et égaux, les quantités d'électricité mises en mouvement lors de la production du circuit inducteur et de celle du circuit induit seront égales; mais les intensités des courants de sens contraire ne seront égales que si les déplacements ont eu la même durée; s'il en était autrement, l'intensité serait d'autant plus grande que la durée du mouvement serait plus courte.

192. — Lorsque l'on produit des courants d'induction dans une bobine en faisant successivement naître et disparaître un courant dans le circuit inducteur, on peut observer de diverses manières que l'intensité du courant induit direct, celui qui correspond à la rupture, est plus grande que celle du courant inverse qui correspond à la fermeture. Ce fait peut s'expliquer simplement par l'existence de l'extra-courant dans la bobine inductrice. Au commencement,

l'extra-courant est inverse et par suite prolonge dans le fil la durée de l'état permanent, c'est-à-dire la période pendant laquelle il y a production : la quantité d'électricité restant la même, quelle que soit la durée, l'intensité diminue par conséquent. Lors de la rupture, l'extra-courant pendant un temps très court augmente l'intensité du courant inducteur et par suite fournit un courant induit de très courte durée et inverse : mais le courant inducteur cesse et la période de l'état variable ne paraît pas changée, seulement une partie a été employée à produire l'effet que nous venons d'indiquer ; il reste moins de temps pour revenir à 0. Le courant inducteur revient même à cette valeur 0 en partant d'une valeur plus élevée que celle qui correspond à l'état permanent ; mais cependant il n'y a pas gain de quantité, parce que, à ce point de vue, il faut tenir compte de l'effet inverse produit pendant le temps très court qui a correspondu à l'exagération de l'extrémité du courant inducteur. Mais il n'en reste pas moins que l'induction s'est produite pendant un temps plus court que si l'extra-courant de rupture n'avait pas existé et, par suite, l'intensité du courant induit direct doit se trouver augmentée d'autant.

Si les interruptions se succèdent très rapidement, l'état permanent du courant inducteur durera très peu, ou même ne sera pas atteint, et alors la période inverse qui accompagne le commencement de la rupture se confondra avec celle qui correspond à la fermeture et donnera un courant induit direct plus long et par suite moins intense que celui qui correspondra à la période de décroissance du courant inducteur.

193. — On peut, de diverses manières, obtenir des courants induits à l'aide desquels il sera possible d'effectuer les vérifications des phénomènes et des lois que nous avons précédemment indiqués.

On peut opérer, et c'est une méthode avantageuse pour certaines recherches, à l'aide de fils enroulés en spirales ou placés sur des bobines à une distance invariable, et en produisant dans le circuit inducteur des alternatives rapides de rupture et de fermeture, à l'aide de la roue à interruption de Masson ou rhéotrope dont on fait varier à volonté la rapidité du mouvement de rotation (112).

Lorsque l'on veut étudier les courants induits, on peut installer dans le circuit induit une roue semblable à la roue à interruption montée sur le même arbre que celle-ci et disposée de manière à intercepter soit les courants inverses, soit les courants directs que l'on pourra ainsi étudier séparément. Enfin, à l'aide de 4 roues analogues montées également sur l'axe de la roue à interruption, on

arrive à faire passer dans un circuit donné les courants induits directs et inverses, tous dans le même sens.

A l'aide de ces derniers appareils, on peut reconnaître facilement que les courants induits ne diffèrent absolument en rien, quant à leurs propriétés, des courants électriques précédemment étudiés.

On peut, par exemple, recueillir seulement les courants inverses et étudier leurs effets sur un voltamètre, sur un électrolyte quelconque, sur un fil fin qui peut être porté à l'incandescence, sur un galvanomètre et, dans tous les cas, on observe les mêmes résultats que si l'on avait opéré avec un courant produit par une pile hydro-électrique. Il y a plus, et l'on peut reconnaître que les lois de Ohm sont applicables aux courants induits, l'intensité pouvant être calculée par les formules indiquées précédemment dans lesquelles, seulement, on remplacera la force électromotrice par une quantité qui, toutes choses égales d'ailleurs, est proportionnelle à la longueur du fil induit.

Les choses se passent absolument de la même manière, si à l'aide du rhéotrope on fait passer dans un circuit et *dans le même sens* en les redressant les courants inverses et directs. Pour les effets de quantité, on observe des résultats doubles de ce que l'on a trouvé pour un seul de ces courants; pour les effets qui dépendent de l'intensité, on observe un résultat moyen si les alternatives se succèdent assez rapidement.

Si le circuit induit est continu, il est parcouru en sens contraire alternativement par des courants égaux en quantités, ce que l'on prouve en mettant dans le circuit un électrolyte, une dissolution de sulfate de cuivre, par exemple. Il n'y a pas de décomposition (Matteucci), car à chaque changement il y a un effet inverse de l'effet précédent. Si l'on emploie un voltamètre, on reconnaît facilement ces effets opposés, car l'eau acidulée est décomposée et, dans chaque éprouvette, on recueille un mélange d'hydrogène et d'oxygène.

Les courants induits alternatifs passant dans un fil métallique fin et résistant l'échauffent et peuvent l'amener à l'incandescence.

Quant à l'action sur l'aiguille aimantée, sur le galvanomètre, elle varie suivant les conditions de l'expérience. Si la résistance du fil du multiplicateur est faible, l'aiguille ne se déplace pas, parce que les actions inverses des courants induits successifs se succèdent dans un temps très court, qui est négligeable par rapport à la durée des oscillations, et que leurs effets se détruisent. Il n'en est plus ainsi si la résistance est grande : le fil du galvanomètre agit alors pour affaiblir l'intensité du courant et il l'affaiblit d'autant plus que cette

intensité est plus faible ; et c'est alors le courant le plus *intense* qui donne le sens de l'effet qui est dû à la différence des deux actions, c'est-à-dire que le galvanomètre indique le sens du courant direct (de fermeture).

Il se produit un effet analogue s'il s'agit d'effets magnétiques, et un barreau d'acier placé dans une hélice magnétisante finit par s'aimanter dans le sens qui correspond au passage du courant direct.

Puisque dans le fil qui complète le circuit dans lequel se trouve une bobine induite il existe à certains moments un courant qui a un sens et une valeur déterminés, nous en pouvons conclure que les deux extrémités de cette bobine présentent une différence de potentiel que l'on peut évaluer, connaissant la résistance du circuit et celle de la bobine et l'intensité du courant. On peut d'ailleurs mettre en évidence cette différence de potentiel par diverses expériences.

La plus simple consiste à laisser dans le circuit un petit intervalle libre; sur chacune des deux extrémités du fil ainsi mises en présence, le potentiel n'a pas la même valeur et, si l'intervalle n'est pas trop grand, la différence peut être assez considérable pour que l'équilibre s'établisse à travers l'air et qu'il se produise une étincelle. Toutes choses égales d'ailleurs, cette différence de potentiel variera inversement au temps pendant lequel l'action inductrice s'est manifestée : elle sera donc plus considérable pour le courant direct (ou de rupture) que pour le courant inverse. De là résulte que si l'intervalle est petit, il y aura étincelle à chaque courant induit, l'action se produisant tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre. Si au contraire l'intervalle est grand, il ne pourra être franchi que pour le cas d'une forte différence de tension et par suite seulement par le courant induit direct. Si même la distance était trop considérable, l'équilibre ne pourrait se rétablir par l'étincelle.

On voit que, en disposant une lacune convenablement choisie, il est possible d'obtenir dans le circuit un courant toujours dans le même sens, c'est-à-dire dans le sens direct.

L'étincelle est d'ailleurs d'autant plus grande que la bobine induite est plus résistante elle-même.

La différence de potentiel entre les deux extrémités libres d'un fil interpolaire peut être mise en évidence et mesurée par tous les appareils qui donnent la mesure du potentiel, comme l'électromètre Thomson, etc.

194. — Ce n'est pas seulement dans des circuits constitués par un fil métallique que peuvent se manifester des courants induits, mais

aussi dans des masses métalliques continues. Le fait a été vérifié par Nobili et Antinori, mais surtout par Matteucci qui opérait de la manière suivante :

Un disque de cuivre CD (fig. 124) tourne rapidement autour d'un axe perpendiculaire à son plan et passant par son centre, à peu de distance des pôles *ns* d'un aimant (ou d'un électro-aimant) puissant. Deux pointes métalliques *a*, *b* sont reliées aux bornes d'un galvanomètre et peuvent venir s'appuyer sur le disque : des dispositions particulières sont prises de manière à déterminer exactement à chaque instant la place occupée par ces pointes. Les pointes sont amenées en contact du disque alors que celui-ci est en mouvement et, en général, on voit aussitôt l'aiguille du galvanomètre se dévier, mettant en évidence l'existence d'un courant; mais par tâtonnement on peut arriver à des positions pour lesquelles l'aiguille du galvanomètre reste au zéro ; il n'y a donc pas de courant entre ces points, ils sont au même potentiel. On peut ainsi, en explorant le disque de proche en proche, tracer les lignes d'égal potentiel et l'on en peut conclure la direction des lignes qui représentent la marche des courants produits, ces lignes étant normales aux lignes équipotentielles.

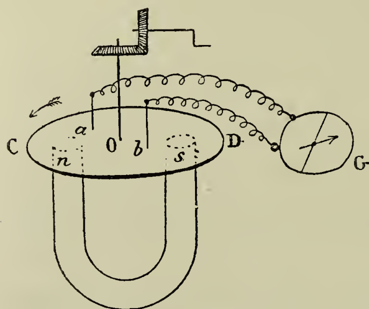


Fig. 124.

Il importe de remarquer que ces lignes sont mobiles par rapport au disque métallique qui se déplace, mais sont fixes dans l'espace, faisant ainsi connaître les modifications apportées au champ magnétique par l'existence d'un conducteur en mouvement. Ces modifications, comme il est facile de le comprendre, différeront avec la force de l'aimant, la distance des pôles au disque, la vitesse de rotation de celui-ci, etc.

195. — Les courants induits qui se produisent dans ces conditions donnent naissance à des effets qui sont explicables par l'application de la loi de Lenz et qui consistent en ce que, étant donnés un masse métallique et un aimant (ou un électro-aimant) placés à une petite distance et en mouvement relatif, ils doivent tendre par la production même des courants induits au repos relatif. Les divers cas qui peuvent se présenter ont été réalisés et l'effet est conforme à la théorie.

1° Un disque de cuivre CD (fig. 125) placé au-dessous d'une aiguille aimantée fixe *ns* et que l'on fait tourner rapidement amène une déviation de l'aiguille aimantée et peut même donner naissance à une rotation continue dans le même sens (Arago). On tend un feuille de papier ou de parchemin entre le disque et l'aiguille pour que l'action observée ne puisse être attribuée à l'agitation de l'air. Si l'on emploie un disque présentant des fentes rayonnantes, il ne se produit aucun effet, ou du moins l'effet est beaucoup moindre, car la discontinuité de la masse métallique gêne la pro-

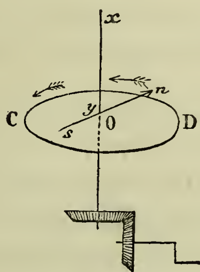


Fig. 125.

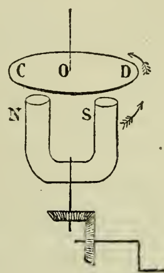


Fig. 126.

duction des courants. Comme on pouvait s'y attendre, l'effet est analogue si l'on remplace l'aimant par un solénoïde ; il est nul si l'on emploie un fer doux.

2° Un disque de cuivre CD (fig. 126) suspendu par un fil sans torsion prend un mouvement de rotation lorsque l'on fait tourner au-dessous un aimant NS autour d'un axe vertical passant entre ses branches (Herschell et Babbage). L'action diminue si le disque présente des fentes, elle augmente si l'on remplit ces fentes avec un métal qui, se soudant au cuivre, rétablit la continuité.

3° Un disque de cuivre maintenu fixe ramène à l'immobilité un aimant animé d'un mouvement de rotation plus rapidement que ce repos n'eût été obtenu si l'aimant avait été seul (Arago, Seebeck) : c'est le cas, par exemple d'une aiguille aimantée oscillant au-dessus d'un disque de cuivre.

4° Un aimant maintenu fixe arrête un disque ou un bloc de cuivre animé d'un mouvement de rotation (Faraday). L'action se produit avec un anneau métallique : il cesse si l'on sectionne l'anneau, ce qui empêche la production du courant.

Si, dans cette expérience, l'appareil est disposé de manière à ce que l'on puisse entretenir la rotation du disque, on reconnaît que pour arriver à ce résultat il est nécessaire de dépenser un travail

mécanique considérable (expérience de Foucault). Ce travail, dont on ne retrouve pas la valeur en travail mécanique ou en augmentation de force vive, puisque l'on ne fait que maintenir un mouvement uniforme, n'est cependant pas perdu, mais seulement transformé, car on remarque que le disque s'échauffe notablement : la transformation a lieu dans ce cas par l'intermédiaire des courants d'induction. On conçoit, sans que nous ayons à insister ici, que cette expérience puisse être utilisée pour la recherche de l'équivalent mécanique de la chaleur.

196. — Nous ne pouvons indiquer en détail tous les phénomènes que l'on observe lorsque l'on étudie les courants d'induction, et nous nous bornerons à signaler un fait qui a donné lieu à diverses applications.

Supposons que l'on place, entre une bobine inductrice et une bobine induite, une autre bobine comprenant un fil convenablement choisi et dont on peut établir ou rompre la continuité du circuit. L'expérience montre que l'action de la bobine induite sur un galvanomètre placé dans son circuit est la même, que le circuit intermédiaire soit ouvert ou qu'il soit fermé; mais il n'en est pas de même pour d'autres effets : l'étincelle est plus forte si le circuit intermédiaire est ouvert que s'il est fermé; l'action magnétisante sur un barreau d'acier placé dans l'axe de la bobine induite est également plus énergique si le circuit intermédiaire est ouvert que s'il est fermé.

197. — Le plus souvent, les courants d'induction sont obtenus à l'aide d'appareils spéciaux dont le nombre s'est considérablement accru dans ces dernières années et dont nous voulons seulement donner ici les principes.

Nous n'insisterons pas sur les dispositions qui permettent d'obtenir des courants induits par l'action des décharges statiques ou par l'action de la terre, et nous classerons les machines d'après le mode d'action effectif :

1° Machines *volta-électriques*, où le courant induit prend naissance par l'influence d'un courant fourni par une pile;

2° Machines *magnéto-électriques*, où l'induction est due à l'action du magnétisme;

3° Machine *dynamo-électriques*, dans lesquelles il n'y a ni aimant, ni courant inducteur, et où l'effet dû primitivement au magnétisme rémanent dépend du travail dépensé dans l'appareil.

198. Bobine d'induction de Ruhmkorff. — La bobine de Ruhmkorff est l'application de la production de courants d'induction

au moment de l'établissement ou de la rupture d'un courant dans un circuit voisin.

La bobine, réduite à sa forme la plus simple, comprend au centre un faisceau de fil de fer doux II′ (fig. 127) autour duquel est enroulé

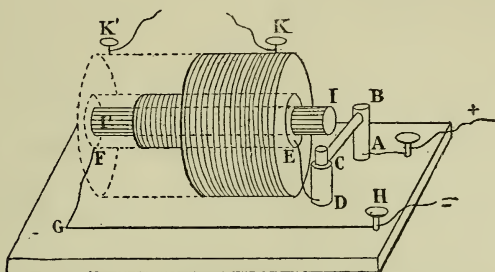


Fig. 127.

un fil de cuivre isolé d'un assez grand diamètre EF dans lequel passera le courant inducteur. Un second fil également isolé, mais d'un diamètre plus fin, est enroulé autour du cylindre précédent et ses extrémités aboutissent à deux bornes K et K′.

Lorsqu'on établira la communication du fil EF avec une pile et au moment où le courant commencera, un courant induit inverse naîtra dans le fil KK′ pour cesser dès que le courant inducteur sera parvenu à l'état permanent. Mais, lorsque l'on rompra le circuit inducteur, un courant induit direct naîtra dans le fil KK′. Il importe de remarquer que le courant inducteur agit en même temps sur le fer doux, qu'il aimante pendant son passage et qui cesse d'être aimanté quand le circuit inducteur est rompu : l'aimantation et la désaimantation produisent également des courants induits, et il est facile de voir que cette action du fer doux produit des effets qui concordent avec ceux qui résultent de l'établissement et de la cessation du courant.

Pour produire les fermetures et les ruptures du circuit inducteur, on peut établir les contacts entre deux pièces métalliques, directement à la main, ou bien intercaler dans le circuit une roue de Masson. Mais le plus souvent on charge le courant inducteur même de produire les effets nécessaires, soit en employant un interrupteur distinct (interrupteur Foucault), qui sera décrit dans un autre chapitre, soit, principalement pour les appareils de petites et de moyennes dimensions, en utilisant l'interrupteur de Neef.

Cet organe consiste en un marteau métallique BC (fig. 127), mobile en B autour d'un axe horizontal et dont la tête C, en fer doux, est placée

au-dessous de l'extrémité des fils de fer II' qui dépassent la joue de la bobine et, au repos, est appuyée sur une colonne métallique CD. Le courant de la pile pénétrant, par exemple, par la bobine A, traverse successivement la colonne AB, le marteau BC, l'enclume CD, puis, par l'intermédiaire d'un fil de communication, le fil inducteur EF pour se rendre à la pile dont le second pôle est relié à la borne H.

Mais, par le fait même du passage du courant, le fer doux II' s'aimante et attire le marteau C qui, soulevé, cesse d'être en contact avec l'enclume : le circuit inducteur est donc rompu et par suite le courant cesse. Mais alors le fer doux II' se désaimante et le marteau n'étant plus attiré retombe sur l'enclume, ce qui ferme le circuit et rétablit le courant. Dès lors les mêmes effets vont se reproduire et le marteau va osciller avec une rapidité qui dépendra principalement de ses dimensions et de son poids. Chaque oscillation complète produira une rupture, puis une fermeture du circuit inducteur, et correspondra à deux courants induits successifs, l'un inverse, l'autre direct. Cette action automatique se continuera aussi longtemps que passera le courant.

Dans beaucoup d'appareils le marteau est remplacé par une lame de ressort qui par son élasticité même tend à écarter la tête métallique du fer doux et, s'appuyant sur une vis en relation avec le fil EF, ferme le circuit. Quand le fer doux s'aimante, la lame est attirée, s'écarte de la vis et le circuit se rompt. Outre que cette disposition peut fonctionner dans toutes les positions, elle présente l'avantage de se prêter à un certain réglage en agissant soit sur la résistance du ressort, soit sur la position de la vis de contact.

Lorsque, dans ces interrupteurs, le marteau s'écarte du contact, il se produit une étincelle assez forte par suite de l'existence de l'extra-courant de rupture qui, prenant naissance dans le circuit inducteur, ajoute son effet à celui du courant de la pile. Aussi convient-il de garnir de platine les parties entre lesquelles éclatent ces étincelles.

Nous indiquerons dans une autre partie les modifications diverses qui ont été apportées à cet appareil dans le but d'en augmenter la puissance.

199. Machine de Clarke et de Pixii. — Ces machines ont été les premiers modèles de machines magnéto-électriques et reposent sur la production de courants induits par le mouvement relatif d'un aimant et d'une bobine. Dans la machine de Pixii (fig. 128), l'aimant mobile tourne devant la bobine recouverte de fils; dans celle de

Clarke (fig. 129), c'est l'inverse: l'aimant est fixe et ce sont les bobines qui se déplacent devant les pôles de l'aimant. La théorie

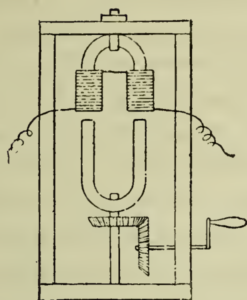


Fig. 128.

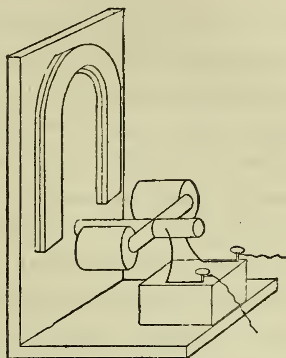


Fig. 129.

est d'ailleurs la même et nous l'expliquerons en supposant que l'aimant soit fixe.

Soient S et N (fig. 130), les deux pôles de l'aimant et soient B, B′, B″ et B‴ les diverses positions d'une bobine tournant autour du centre O dans le sens indiqué par les flèches pennées Pour simplifier et à cause des différences de distance, on peut admettre que lorsqu'une bobine est dans le voisinage de l'un des pôles, ce pôle agit seul. Considérons donc la bobine placée d'abord en face de N et s'en éloignant d'un mouvement que nous supposons uniforme : il naîtra dans le circuit dont fait partie le fil de cette bobine un courant de même sens que le courant particulaire du pôle N de l'aimant, c'est-à-dire un courant dont le sens est donné par la flèche non pennée : ce courant, fort d'abord, s'affaiblira, car les *variations* de distance seront moins rapides à mesure qu'on s'éloignera du pôle N; mais la bobine s'approchera du point P et l'action du pôle S commencera à se faire sentir. Le pôle S correspond à un mouvement particulaire inverse de celui de N; mais comme la bobine se rapprochant de S y fait naître un courant induit inverse, cette bobine sera

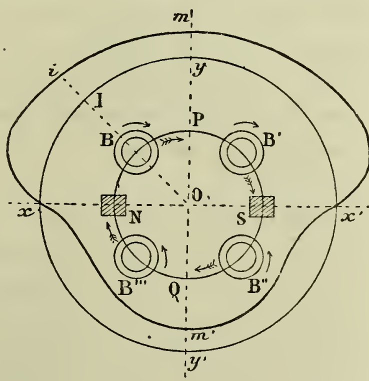


Fig. 130.

traversée par un courant de même sens qu'il était dans le premier quadrant et qu'il continue par suite.

Mais au moment où la bobine dépasse le pôle S, le courant change brusquement de sens, car il s'éloigne des courants particulaires dont il s'approchait. Au sens près, les mêmes effets vont se produire pour cette seconde moitié de la révolution et le courant d'abord décroissant, puis croissant ensuite sans changer de sens, s'intervertira brusquement lorsque la bobine passera devant le pôle N. On peut représenter graphiquement ces effets en convenant, pour chaque position de la bobine, de porter à partir de la circonférence $xyx'y'$ sur le rayon correspondant comme rayon vecteur une longueur représentant l'intensité du courant, et en convenant de la porter en dedans ou en dehors de cette circonférence suivant le sens du courant. On aurait alors une courbe analogue à la courbe $xmx'm'$.

Ainsi une bobine qui décrit une circonférence complète dans ces conditions est parcourue par deux courants inverses, les changements se produisant aux moments où la bobine traverse la ligne des pôles xx'.

On conçoit qu'au lieu d'avoir une seule bobine circulant dans le champ magnétique engendré par les pôles N,S, on pourrait en avoir plusieurs qui se mouvraient simultanément et dans chacune desquelles se produiraient les phénomènes dont nous venons de parler. On peut admettre également qu'il serait possible de trouver une disposition mécanique qui permettrait de recueillir tous ces courants dans un même circuit et de telle manière qu'ils y aient tous le même sens.

Dans la machine de Pixii et dans celle de Clarke, on emploie seulement deux bobines B_1, B_2 (fig. 131) diamétralement opposées, dont les noyaux en fer doux sont réunis par une traverse de même métal, constituant ainsi un électro-aimant à deux branches. Le redressement de l'un des courants par rapport à l'autre s'effectue simplement en enroulant le fil en sens contraires sur les deux bobines. Le courant change de sens à la fois dans les deux bobines lorsque celles-ci passent devant la ligne des pôles.

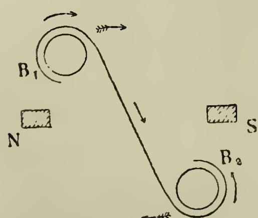


Fig. 131.

Dans la machine de Pixii l'électro-aimant est fixe et l'aimant mobile : il suffit de mettre les bouts libres du fil de l'électro-aimant en communication avec un fil métallique pour constituer un circuit

qui sera traversé par des courants alternatifs. L'axe de rotation de l'aimant en fer à cheval que l'on emploie est sur le prolongement de l'axe de l'électro-aimant.

Dans la machine de Clarke l'axe de rotation de l'électro-aimant est perpendiculaire au plan de l'aimant en fer à cheval qui est fixe. Mais à cause du déplacement continuel de l'électro, il faut une disposition spéciale pour recueillir les courants et les envoyer dans un circuit : à cet effet les extrémités libres BB′ (fig. 132 et 133) des fils enroulés sur les bobines viennent aboutir à des pièces métalliques portées sur un cylindre de matière isolante : deux frottoirs à ressort auxquels aboutissent les extrémités du circuit sont en contact constamment avec les pièces métalliques de manière à fermer le circuit. Les pièces doivent avoir des dispositions différentes, suivant que l'on veut recueillir dans le circuit des courants alternatifs, comme ils sont effectivement donnés par l'induction, ou des courants toujours redressés, des courants de même sens.

Les dessins montrent d'une manière nette diverses dispositions du *commutateur* (nom donné au cylindre muni de ses contacts

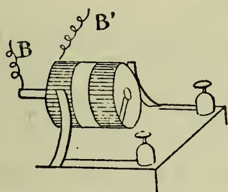


Fig. 132.

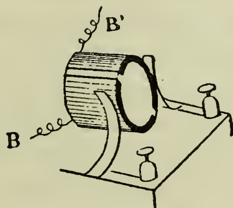


Fig. 133.

métalliques) et donnant l'une (fig. 132) des courants alternatifs, l'autre des courants redressés (fig. 133).

La machine de Pixii peut également donner des courants redressés : il suffit d'employer un commutateur analogue au précédent, monté sur l'axe de rotation de l'aimant et sur lequel appuient des frottoirs dont les uns communiquent aux fils de l'électro-aimant et les autres au circuit extérieur.

200. — Il n'est pas nécessaire pour qu'il y ait production d'un courant d'induction par l'action d'un aimant qu'il y ait apparition ou disparition du magnétisme ou déplacement relatif de l'aimant et d'une bobine. La bobine restant fixe et, par exemple, entourant les pôles d'un aimant, toute variation dans l'intensité ou dans la distribution du magnétisme fera naître un courant dont le sens est déterminé par les lois générales (185).

C'est sur cette remarque qu'est basée la machine d'induction de Page. Deux bobines entourent les pôles d'un aimant en fer à cheval devant lequel tourne avec rapidité une traverse de fer doux : les variations de position du fer doux par rapport à l'aimant amènent des changements dans la distribution du magnétisme, et des courants alternatifs apparaissent aussitôt dans un circuit qui comprend les bobines. On conçoit d'ailleurs que l'on puisse redresser les courants à l'aide d'un commutateur. On peut faire varier l'intensité des courants produits en approchant ou éloignant le fer doux de l'aimant.

Cette production du courant présente un intérêt spécial, à cause de la théorie du téléphone que nous développerons plus tard.

On peut remplacer dans l'appareil de Page la traverse de fer doux par deux bobines d'un électro-aimant. Les noyaux en fer doux des bobines produisent l'effet que nous venons d'indiquer; mais, de plus, ces noyaux s'aimantant et se désaimantant alternativement produisent des courants d'induction dans les bobines, et l'on conçoit que l'on puisse relier convenablement ces bobines au circuit des bobines fixes pour ajouter les effets produits. Certaines machines médicales sont basées sur cette disposition.

201. Machine Gramme. —La machine Gramme, dont l'invention est assez récente, diffère des machines précédentes en ce qu'elle donne directement un courant continu sans l'emploi de commutateurs ou de redresseurs. L'explication des phénomènes auxquels elle donne naissance n'est pas encore bien certaine : on peut cependant accepter la suivante qui est basée sur les mêmes données que celle des autres machines.

Considérons un aimant AB (fig. 134) ou un solénoïde équivalent et imaginons qu'une petite bobine entourant le barreau se déplace de A en B : à chaque instant cette bobine s'éloignera des spires situées du côté A pour se rapprocher de celles qui sont à l'autre extrémité : il y aura donc des effets opposés qui se détruiront par-

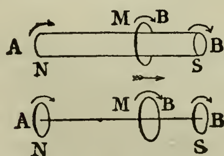


Fig. 134.

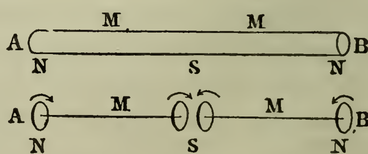


Fig. 135.

tiellement ; mais tant que cette bobine n'aura pas atteint le milieu M

de l'aimant, elle se rapprochera d'un nombre de spires plus grand que celui des spires dont elle s'éloigne : il y aura donc prédominance des premières sur les secondes et par suite un courant circulera dans la bobine, courant inverse. Mais à partir du milieu M, les effets seront renversés et le sens du courant devra se renverser aussi.

Si le barreau AB (fig. 135) a des points conséquents, on reconnaîtra de la même façon que le passage devant l'un d'eux ne change pas le sens du courant qui, comme précédemment, se renversera devant chaque ligne neutre M, M′. Il en serait évidemment de même si l'on considérait l'ensemble de deux ou plusieurs barreaux réunis par leurs pôles de même nom.

Si enfin la bobine que nous avons imaginée se meut sur un cercle aimanté présentant deux pôles N, S (fig. 136) et que l'on peut considérer comme constitué par la réunion, par leurs pôles de même nom, de deux aimants demi-circulaires, les mêmes effets se présenteront et le courant changera de sens en face des lignes neutres M et M′ con-

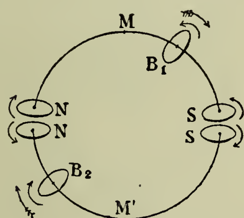


Fig. 136.

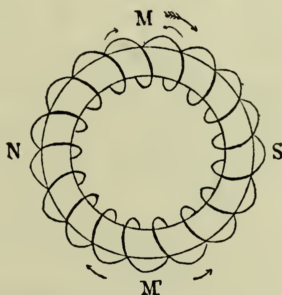


Fig. 137.

servant le même sens de M en M′ par N et le sens opposé de M′ en M par S, le sens de la rotation étant celui de la flèche pennée.

Considérons maintenant, non plus une petite bobine, mais un solénoïde continu (fig. 137) enroulé autour de l'anneau aimanté et tournant d'une manière continue également sans entraîner l'aimant. Les effets que nous signalions ci-dessus se produiront de la même façon pour chaque spire. A un même instant, toutes les actions exercées sur les spires comprises entre M, N, M′ seront concordantes et donneront un courant allant par exemple de M vers M′, tandis que les actions exercées sur les spires comprises dans la partie M′, S, M seront concordantes entre elles, mais inverses des précédentes, donnant par conséquent un courant allant égalément de M en M′, mais en passant par S.

Tout se passera donc comme s'il existait, en M et M′, des causes quelconques établissant une différence de potentiel qui se manifesterait par l'existence des courants que nous venons d'indiquer. Si donc on établit en M et M′ les deux extrémités d'un circuit formant dérivation, extrémités qui seront mises en contact successivement avec chaque spire du solénoïde circulaire au moment où elle passera en l'un de ces points, le courant dû à cette différence de potentiel se divisera et une partie traversera la dérivation toujours dans le même sens et d'une manière continue, au moins sensiblement si les spires se succèdent rapidement.

202. — On ne peut matériellement réaliser cette disposition d'un solénoïde courbe tournant autour d'un aimant circulaire fixe qu'il entoure ; mais on obtient un résultat analogue en enroulant le solénoïde à demeure sur un anneau de fer doux qui tourne entre les pôles N, S (fig. 138) d'un aimant fixe. Les pôles développés dans

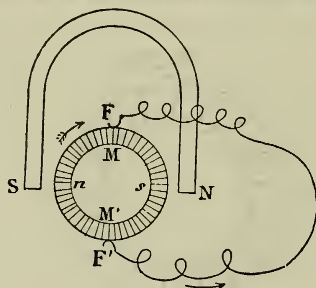


Fig. 138.

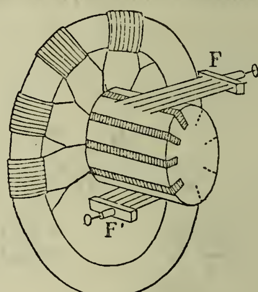


Fig. 139.

cet anneau resteront fixes dans l'espace, bien que se déplaçant sur l'anneau puisqu'ils se produiront toujours en face des pôles de l'aimant.

En réalité, l'action est plus complexe, puisqu'il faudrait également tenir compte des actions exercées sur le solénoïde par les pôles de l'aimant.

L'établissement successif des contacts des extrémités de la dérivation avec les diverses spires successives se fait de la façon suivante : le fil isolé qui entoure l'anneau de fer doux est divisé en un certain nombre de bobines élémentaires (fig. 139) qui remplacent pratiquement les spires que nous imaginions précédemment. L'extrémité du fil de chaque bobine est reliée avec l'extrémité de la bobine suivante, et ces deux fils sont mis à la fois en communication avec une lame métallique collectrice. Les lames collectrices, en nombre égal à celui des secteurs du solénoïde, sont

réunies à l'aide d'une substance isolante et forment un cylindre, le *collecteur*, qui est entraîné dans le mouvement de rotation de l'anneau. Deux frotteurs F, F′, constitués par des balais en fils métalliques, s'appuient sur le cylindre collecteur en deux points diamétralement opposés qui sont ceux entre lesquels la différence de potentiel est la plus grande. Ces points, d'après la théorie donnée précédemment, devraient être les points M et M′ situés sur la ligne neutre. En réalité, il n'en est pas ainsi et les balais doivent être déplacés d'un angle que la pratique indique, pour produire l'effet maximum.

Les extrémités du circuit qui doit être parcouru par le courant sont reliées aux balais ; si ceux-ci ne touchaient chacun à la fois qu'une seule lame collectrice, il y aurait dans le circuit une interruption de courant chaque fois que le balai passerait sur une des parties isolantes du collecteur. Mais en réalité, le balai, par suite de sa flexibilité, touche plusieurs lames collectrices simultanément, de telle sorte qu'il y a toujours contact : le courant n'est jamais interrompu ; il subit, il est vrai, des variations d'intensité suivant le nombre des lames collectrices qui sont à la fois en contact, mais ce nombre varie (il ne devrait théoriquement varier que de 1) et ces variations sont d'autant moins sensibles dans les effets qu'elles produisent que le contact se fait sur un plus grand nombre de lames.

La première idée de cette machine a été indiquée par M. Paccinotti (1860) dans un mémoire qui est resté ignoré jusqu'à ces derniers temps. M. Gramme l'a découverte à nouveau et il convient d'ajouter qu'il a vu immédiatement le parti que l'on en pouvait tirer au point de vue pratique et industriel. Il faut reconnaître que cette invention a été le point de départ de nombreux progrès dans l'électricité appliquée : c'est du reste un point sur lequel nous reviendrons dans une autre partie de cet ouvrage.

203. Machine magnéto-électrique a excitatrice; machine dynamo-électrique. — On conçoit aisément que, dans les diverses machines d'induction magnéto-électriques que nous avons décrites, il est possible de remplacer les barreaux aimantés par des électro-aimants qui sont mis en activité par un courant traversant leurs bobines. Cette disposition présente un intérêt évident, car on peut obtenir des électro-aimants dont la puissance est bien supérieure à celle des aimants.

Il serait possible que le courant qui anime les électros fût fourni par une pile ; mais cette disposition ne présenterait pas d'intérêt

pratique. Il est au contraire avantageux d'employer une machine magnéto-électrique de faibles dimensions pour produire le courant qui doit animer les électros de la machine principale : cette machine auxiliaire est désignée généralement sous le nom de machine excitatrice. Telle est l'idée qui, appliquée pour la première fois par Wilde, a depuis donné naissance à divers modèles intéressants.

Dans ces machines, qui sont actuellement fort employées et dont nous aurons l'occasion de décrire en détail divers types, il n'y a plus d'aimant. Une bobine, telle que nous l'avons indiquée pour la machine Gramme, ou basée sur un principe analogue, tourne entre les pôles d'un électro-aimant. Le courant qui excite cet électro-aimant est emprunté à la machine même : on comprend, en effet, que si celle-ci fonctionne, on puisse utiliser tout ou partie du courant produit à parcourir les fils qui entourent l'électro-aimant et mettre dès lors ceux-ci en action. Mais il faut une excitation primitive qui, chaque fois que la machine s'est arrêtée, commence la mise en marche. On trouve cette excitation dans le magnétisme, rémanent (8) qui subsiste toujours dans le fer doux : ce magnétisme, bien que faible, donne naissance à des courants d'induction faibles aussi, mais ceux-ci, traversant l'électro, augmentent sa puissance et par suite l'action sur la bobine mobile, de telle sorte qu'il y a réactions successives des parties en présence les unes sur les autres, l'intensité du courant croissant jusqu'à ce qu'il s'établisse un état d'équilibre électrique.

Il nous suffit ici d'indiquer cette idée générale sur laquelle nous lreviendrons ultérieurement.

204. Travail mécanique absorbé dans la machine d'induction. — Il importe de remarquer que, comme cela est indiqué par la loi de Lenz, le déplacement des pièces mobiles dans le champ magnétique ne peut se produire et fournir un courant électrique que moyennant la dépense d'une certaine quantité de travail mécanique. On ne retrouve pas d'ailleurs en énergie électrique l'équivalent du travail mécanique ainsi fourni : outre qu'il y a à vaincre les frottements des diverses pièces les unes contre les autres, l'expérience montre que les fils des bobines s'échauffent et que, par conséquent, une partie du travail est transformée inutilement en chaleur. Ajoutons même que l'échauffement des fils et des conducteurs peut devenir un inconvénient dans la pratique et que l'on est obligé de prendre des dispositions pour les refroidir le plus possible. Nous reviendrons dans un chapitre spécial sur ces dispositions ainsi que sur la valeur du ren-

dement que l'on peut obtenir des machines d'induction actuellement en usage.

205. Réversibilité des machines d'induction. — Au point de vue le plus général, on voit qu'une machine d'induction est un appareil destiné à transformer du travail mécanique en énergie électrique. Ces machines, la plupart d'entre elles du moins et notamment celles qui fournissent des courants continus, jouissent d'une propriété fort intéressante et qui semble devoir servir de point de départ à de nombreuses applications : elles sont *réversibles*. Autrement dit, une machine Gramme, par exemple, à travers la bobine de laquelle on fera passer un courant électrique deviendra le siège d'une action mécanique : la bobine se mettra à tourner spontanément, à la condition bien entendu que le courant sera assez intense pour vaincre les résistances passives. Non seulement la bobine tournera, mais si elle est en relation avec une machine convenablement disposée, elle sera susceptible de développer du travail mécanique dont la quantité dépendra de l'intensité du courant.

Il n'est pas nécessaire de faire une théorie spéciale pour démontrer qu'il doit en être ainsi, et il suffit de se reporter à ce que nous avons dit relativement à la réciprocité des relations entre les actions mécaniques et les courants : cette réciprocité, que nous avons étudiée dans ses manifestations élémentaires, doit exister nécessairement dans des appareils où ces actions élémentaires sont seulement différemment combinées.

Il est clair que, dans ce cas, on ne retrouve pas en travail mécanique toute l'énergie électrique qui a été dépensée : il y a des pertes, et pour les mêmes raisons que nous avons signalées plus haut.

TABLEAU I

CORPS MAGNÉTIQUES ET DIAMAGNÉTIQUES.

Corps magnétiques.

Fer	Papier	
Nickel	Cire à cacheter	Amiante
Cobalt	Spath fluor	Vermillon
Manganèse	Peroxyde de plomb	Tourmaline
Chrome	Plombagine	Hoiulle
Cerium	Encre de Chine	La plupart des sels des métaux inscrits ci-dessus (excepté les ferro et ferri-cyanures).
Titane	Porcelaine de Berlin	
Palladium	Plomb rouge	
Osmium	Sulfate de zinc	
Platine[1]	Gomme laque	

Corps diamagnétiques.

Bismuth	Chlorhydrate d'ammoniaque	Solutions des sels alcalins et terreux
Antimoine	Chlorure de plomb	
Zinc	— de sodium	Verre
Etain	Azotate de potasse	Litharge
Cadmium	Carbonate de soude	Acide arsénieux
Sodium	Spath d'Islande	Iode
Mercure	Oxalate de plomb	Phosphore
Plomb	Emétique	Soufre
Argent	Acide tartrique	Résine
Cuivre	Eau	Spermacéti
Or	Alcool	Caféine
Arsenic	Ether	Quinquina
Urane	Sucre	Acide margarique
Rhodium	Amidon	Huile d'olive
Iridium	Gomme arabique	Essence de térébenthine
Tungstène	Bois	Jais
Cristal de roche	Ivoire	Caoutchouc
Sulfate de chaux	Mouton desséché	Bœuf desséché
— de baryte	Bœuf frais	Sang frais
— de soude	Acide azotique	Plumes
— de magnésie	— sulfurique	Pomme
Alun	— chlorhydrique	Pain

1. D'après Wiedemann, le platine chimiquement pur serait diamagnétique.

TABLEAU II

CORPS BONS CONDUCTEURS ET MAUVAIS CONDUCTEURS.

Dans cette liste, donnée par Faraday, les corps sont rangés par ordre de conductibilité décroissante :

Tous les métaux
Charbon calciné
Plombagine
Acides concentrés
Charbon pulvérisé
Acides étendus
Solutions salines
Minerais métalliques
Liquides animaux
Eau de mer
Eau de source
Eau de pluie
Glace au-dessus de — 10°5,
Neige
Végétaux vivants
Animaux vivants
Fumée
Vapeur d'eau
Sels solubles dans l'eau
Air raréfié
Vapeur d'alcool
Bois séché
Plumes
Parchemins
Papier sec
Cheveux
Laine
Soie sèche
Soie blanchie
Soie grège
Pierres précieuses
Ebonite
Vapeur d'éther
Terres et pierres uhmides
Verre pulvérisé
Fleur de soufre
Oxydes métalliques secs
Huiles
Cendres de végétaux
Cendres de substances animales
Cristaux transparents divers
Glace sèche au-dessous de — 10°,5
Phosphore
Chaux
Craie sèche
Carbonate de baryte naturel
Lycopode
Caoutchouc
Camphre
Roches siliceuses et argileuses
Marbre sec
Porcelaine
Végétaux secs
Diamant
Mica
Verre
Jais
Cire
Soufre
Résines
Ambre
Gutta-percha
Gomme laque

TABLEAU III

POUVOIRS SPÉCIFIQUES INDUCTEURS

Air et tous les gaz secs..	1	Soufre.................	1.93
Résine................	1.77	Gomme laque..........	1.95
Poix..................	1.80	Paraffine.........	1.98
Cire..................	1.86	Caoutchouc............	2.8
Verre.................	1.90	Gutta-percha..........	4.2
		Mica..................	5

TABLEAU IV

CONDUCTIBILITÉS ET RÉSISTANCES RELATIVES A 0°

	CONDUCTIBILITÉ	RÉSISTANCE
Argent....................	100.00	1.00
Cuivre	99.95	1.00
Or........................	77.96	1.28
Aluminium.................	33.76	2.96
Zinc......................	29.02	3.44
Cadmium...................	23.72	4.21
Platine	18.03	5.55
Cobalt...............	17.22	5 80
Fer.......................	16.81	5.95
Nickel....................	13.11	7.63
Etain.....................	12.36	8.09
Plomb.....................	8.32	12.02
Antimoine	4.62	21.65
Mercure...................	1.63	61.35
Bismuth	1.25	80.00
Laiton....................	20	5
Acier.....................	16	6.25
Argent allemand....	12 à 16	8 à 6
Graphite..................	0.7	145
Dissolution de sulfate de cuivre saturée..................	0.00000542	16855520
Dissolution de sulfate de cuivre saturée à moitié...........	0.00000347	26327637
Dissolution de sulfate de zinc saturée	0.00000900	15861267
Dissolution de sulfate de zinc saturée à moitié...........	0.00001770	12855836
Dissolution de chlorure de sodium saturée..............	0.00003152	2903558
Dissolution de chlorure de sodium saturée à moitié......	0.00002308	3965421
Acide sulfurique 1, eau 11....	0.00008868	1032020
Eau distillée................	—	6754208000

TABLEAU V

THERMO-ÉLECTRICITÉ.

Dans cette liste, due au professeur Cumming, les corps sont rangés dans un ordre tel que lorsqu'on chauffe la soudure de deux quelconques d'entre eux, chacun prend un potentiel positif par rapport à l'autre si celui-ci est après dans la liste, ou un potentiel négatif par rapport à l'autre si celui-ci précède dans la liste. On obtient l'effet inverse en refroidissant la soudure.

Galène
Bismuth
Mercure
Nickel
Platine
Palladium
Rhodium
Or
Cuivre
Argent
Zinc
Cadmium

Cobalt
Manganèse
Étain
Plomb
Laiton

Houille
Plombagine
Fer
Arsenic
Antimoine

APPLICATIONS

DES THÉORIES GÉNÉRALES DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

DES MESURES MAGNÉTIQUES ET ÉLECTRIQUES

206. Système d'unités absolues. — Unités fondamentales. — La première étude des phénomènes physiques ne permet pas de reconnaître les liens qui existent entre eux : aussi a-t-on primitivement imaginé un agent distinct, une cause spéciale pour chaque ordre de manifestations, et a-t-on fait choix d'une unité particulière lorsque l'on s'est proposé d'effectuer des mesures.

On sait maintenant que les phénomènes physiques ne sont pas indépendants les uns des autres; qu'ils sont reliés entre eux et avec les phénomènes mécaniques, au moins par voie d'équivalence. Sans parler donc ici des simplifications apportées dans les théories, et dont nous avons vu un exemple remarquable dans la théorie du magnétisme due à Ampère (177), nous dirons que l'on conçoit qu'il y a un intérêt réel à faire choix d'unités qui soient liées les unes aux autres conformément aux lois connues, de manière à limiter au minimum les données arbitraires. Un système d'unités ainsi combiné constitue ce que l'on appelle un système *d'unités absolues* (le mot *absolu* ne devant pas être pris ici dans son sens propre), dans

lequel on a adopté le plus petit nombre possible d'unités prises arbitrairement, ces dernières correspondant à des notions qui sont irréductibles les unes aux autres.

Les trois notions irréductibles auxquelles correspondent ce que l'on nomme les unités principales sont : la longueur, la masse et le temps. Ainsi que nous l'avons déjà indiqué (17), la *British Association* a proposé un système complet de mesures destinées à l'étude du magnétisme et de l'électricité, et l'entente s'est faite sur tous les points entre les physiciens des divers pays, à la suite du Congrès international des électriciens en 1881. Les unités principales adoptées sont :

Pour la longueur : le centimètre (la 100e partie du mètre étalon déposé aux Archives, à Paris).

Pour la masse : le gramme-masse, masse d'un corps pesant 1 gramme à Paris, c'est-à-dire d'un corps dont le poids est la millième partie du kilogramme étalon déposé aux Archives.

Pour le temps : la seconde (soit la 86400e partie du jour solaire moyen).

Le système caractérisé par ces unités est souvent désigné sous le nom de système C G S. (Centimètre, Gramme, Seconde).

207. Unités dérivées. — Nous devons dire, sans vouloir insister, qu'il existe des unités dérivées de ces unités principales, unités dont les principales sont les suivantes :

Unité de surface : surface d'un carré ayant pour côté l'unité de longueur, centimètre carré.

Unité de volume : volume d'un cube ayant pour arête l'unité de longueur, centimètre cube.

A ces unités, qui correspondent à des notions géométriques et dérivent seulement de l'idée de longueur, il faut joindre celles qui dérivent de la cinématique et dépendent à la fois de la longueur et du temps :

Unité de vitesse : vitesse d'un point qui parcourt l'unité de longueur dans l'unité de temps, soit un centimètre par seconde;

Unité d'accélération : accélération d'un point dont la vitesse s'est accrue d'une unité dans l'unité de temps.

Ces unités n'ont pas reçu de noms particuliers.

Enfin, d'autres unités, correspondant à des données fournies par la dynamique, dépendent à la fois des trois unités principales, longueur, temps, masse; ce sont :

Unité de force : force capable de communiquer en une seconde

une accélération égale à l'unité à un corps ayant l'unité de masse; cette unité a reçu le nom de *dyne*[1];

Unité de travail : travail correspondant à l'action d'une force égale à l'unité (1 dyne) appliquée à un point qui se meut dans sa direction pendant une longueur égale à l'unité; cette unité est appelée l'*erg*[2].

208. Dimensions des unités. — Il existe entre les unités dérivées et les unités principales des relations bien déterminées, de telle sorte que si l'on venait à changer, d'une manière quelconque, une ou plusieurs des unités principales, les unités dérivées changeraient aussi; il est clair que, connaissant les modifications apportées aux unités principales, il serait possible de calculer les changements qu'il faudrait faire subir aux unités dérivées. Les relations qui existent ainsi entre les deux valeurs des unités dérivées, calculées en fonction des rapports des valeurs des unités principales, constituent ce que l'on appelle les *dimensions* de ces unités dérivées.

Nous désignerons d'une manière générale par L, M, T respectivement les rapports qui existent entre les grandeurs des unités de longueur, de masse et de temps déterminées dans le premier système et dans le second; si alors nous cherchons comment varient les unités dérivées, c'est-à-dire si nous déterminons leurs *dimensions*, nous trouverons les valeurs suivantes, sur lesquelles nous ne croyons pas nécessaire d'insister[3] :

1. Un corps tombant en chute libre à Paris prend un mouvement uniformément accéléré dont l'accélération est égale à $9^{m},8088$; les forces étant proportionnelles aux accélérations, on voit que la dyne, c'est-à-dire la force qui devrait être appliquée à un corps ayant une masse égale à 1 pour prendre une accélération de 1^{cm} devrait être égale à :

$$\frac{1^{gr}}{980,88} = 0^{gr},001019.$$

Si le même corps était transporté en un autre point du globe, son poids serait changé; mais il en serait de même de la valeur de l'accélération et, comme les variations sont proportionnelles, la valeur du rapport ne serait pas modifiée.

Comme première approximation, on peut prendre la dyne égale à $0^{gr},001$, avec une erreur qui ne dépasse pas 2 p. 100.

2. L'unité pratique de travail mécanique est le kilogrammètre, travail correspondant à l'élévation verticale de 1 mètre d'un poids égal à 1^{kgr}. On voit, d'après les remarques précédentes, que 1 kilogrammètre équivaut à

$$(980,88 \times 1000)\,(100) = 980,88 \times 10^{5} \text{ erg.}$$

ou approximativement 10^{8} erg.

3. Soient, en effet, par exemple, λ, ς, λ', ς' les nombres qui mesurent une longueur et une surface données pour deux unités de longueur et de surface qui sont respectivement l, l', l^2, l'^2 avec la condition

Unité de surface	L^2
Unité de volume	L^3
Unité de vitesse	$LT^{-1} = \frac{L}{T}$
Unité d'accélération	$LT^{-2} = \frac{L}{T^2}$
Unité de force	MLT^{-2}
Unité de travail	ML^2T^{-2}.

209. Des unités absolues en physique. — Toutes les grandeurs qui se trouvent liées par des relations précises avec des grandeurs géométriques et des grandeurs mécaniques, peuvent être mesurées à l'aide d'unités qui se rattachent au système absolu dont nous venons de parler : c'est le cas, par exemple, pour les grandeurs physiques.

On n'a pas pris toujours pour unités des valeurs se rattachant à ce système : c'est ainsi que la *calorie*, unité de quantité de chaleur, est liée au *degré* centigrade qui a été *arbitrairement* choisi et n'a aucune relation avec les unités absolues. On eût pu cependant faire choix d'une unité absolue de chaleur : on sait en effet qu'il y a transformation par voie d'équivalence entre le travail mécanique et la chaleur. Il eût suffi de prendre pour *unité absolue* de chaleur la quantité de chaleur qui équivaut à l'unité de quantité de travail, à l'*erg*. On eût établi entre les quantités de chaleur et les températures la même relation qui existe actuellement : l'unité de température serait ainsi l'élévation subie par une masse d'eau égale à l'unité (1 centimètre cube au maximum de densité) lorsqu'on lui communique une unité de chaleur.

Il va sans dire que, si les unités ainsi déterminées étaient jugées trop petites dans la pratique, il aurait été possible de faire choix

$$\frac{l}{l'} = L.$$

On a

$$\lambda\, l = \lambda'\, l' \qquad \varsigma\, l^2 = \varsigma'\, l'^2$$

ou

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = L \qquad \frac{\varsigma'}{\varsigma} = L^2.$$

Pour une vitesse, on aurait

$$v = \frac{l}{t} \qquad v' = \frac{l'}{t'}$$

ou

$$\frac{v}{v'} = \frac{l}{l'} \times \frac{t'}{t} = \frac{L}{T} = LT^{-1}.$$

d'unités pratiques qui eussent été des multiples déterminés de l'unité absolue.

Lorsque les recherches précises ont commencé sur la chaleur, on ignorait les relations qu'elle présente avec les phénomènes mécaniques : on fit donc choix d'unités entièrement arbitraires. Leur usage est si général maintenant qu'il est, sinon impossible, au moins très difficile de penser à substituer le système absolu au système vulgaire.

Les mêmes conditions ne se sont pas présentées pour l'électricité et l'avantage d'employer des unités absolues a été signalé alors que, pour ainsi dire, on n'avait fait choix d'aucune unité arbitraire, sauf une. Grâce aux travaux et aux déterminations faits sous les auspices de la *British Association for the advancement of science* dès 1861, on décida d'accepter en principe le système des unités électro-magnétiques qui avait été indiqué par Weber et qui fut rattaché au système C G S dont nous avons déjà parlé.

Le système fut définitivement adopté par le Congrès international des électriciens (1881), et l'on fixa également les unités pratiques qui sont des multiples ou des sous-multiples décimaux des unités absolues.

Nous allons indiquer le système adopté; mais auparavant nous traiterons la question d'une manière plus générale, en indiquant dans leur ensemble les systèmes qu'il eût été possible de choisir en les rattachant au système absolu.

210. Unités de pôle magnétique et de champ magnétique. — Nous avons donné la relation (17)

$$f = \frac{mm'}{d^2},$$

qui lie les attractions ou répulsions qui se manifestent entre deux pôles magnétiques. Cette équation définit l'unité de magnetisme, car si l'on prend $d = 1$ et $m = m' = 1$, on a également $f = 1$. L'unité de magnétisme est la quantité qui, agissant sur une quantité égale située à l'unité de distance (1 centimètre), produit une force attractive ou répulsive égale à l'unité (1 dyne). On voit dès lors comment cette unité, qui n'a pas reçu de nom particulier, est reliée au système général des unités absolues, système C G S[1].

1. En se basant sur les dimensions déjà données de la force, on trouve facilement que la dimension d'une unité de pôle est

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}.$$

La relation (21), qui définit l'intensité d'un champ magnétique,

$$f = m \text{ H},$$

donne de même l'unité de champ magnétique. Si l'on fait H = 1 et $m = 1$, on a $f = 1$: l'unité de champ magnétique est donc le champ qui exerce une force égale à l'unité sur un pôle égal à l'unité[1].

211. Unité de quantité d'électricité. Système électrostatique. — La loi de Coulomb relative aux attractions et répulsions électriques se traduit par la formule

$$f = -\frac{ee'}{d^2}.$$

Comme la précédente, cette équation définit implicitement l'unité de quantité d'électricité, car si l'on a $e = e' = 1$ et $d = 1$, il vient $f = 1$ au signe près. L'unité de quantité d'électricité est donc la quantité d'électricité qui, agissant sur une quantité égale située à l'unité de distance, produit une force attractive ou répulsive égale à l'unité.

Cette unité qui n'a pas reçu de nom est reliée au système général des unités absolues[2].

212. Unité de courant. Système électrodynamique. — Les courants agissent les uns sur les autres par attraction ou répulsion lorsqu'ils sont placés parallèlement (167).

Nous avons donné la loi élémentaire (formule d'Ampère) qui régit ces actions et nous avons dit que le calcul permet de trouver leurs valeurs pour des cas déterminés.

On déduit de cette formule, par une double intégration, qu'un courant indéfini d'intensité i' agissant sur un courant parallèle de longueur l, d'intensité i et placé à une distance d, produit une force (attractive ou répulsive suivant le sens)

On a, en effet, $mm' = fd^2$, de telle sorte que les exposants qui entrent dans cette formule sont la moitié de ceux qui correspondent au produit de fd^2.

1. On reconnaît que les dimensions du champ magnétique sont :

$$M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}$$

puisqu'elles sont celles du quotient $\frac{f}{m}$ et que l'on connaît celles de f, soit MLT^{-2}, et celles de m que nous venons de déterminer.

2. Comme l'unité de pôle magnétique, les dimensions de cette unité sont :

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$$

$$f = \frac{ii'l}{d}.$$

Cette équation définit l'unité d'intensité ; car si l'on prend $i = i' = 1$ en même temps que $l = 1$ et $d = 1$, il vient $f = 1$; d'où l'on déduit la définition de cette unité.

213. Unité de courant. Système électromagnétique. — Enfin, nous avons dit aussi (177) qu'il existe des forces attractives ou répulsives entre les courants et les aimants. L'attraction (ou la répulsion) produite par un élément ds d'un courant d'intensité i sur un pôle d'intensité m agissant à la distance r est représentée par la formule

$$f = \frac{m\, i\, ds}{r^2}$$

dans laquelle l'élément de courant est supposé perpendiculaire à la ligne qui joint le pôle à son milieu. (Cette formule, comme nous l'avons dit, est vraie pour les solénoïdes et se déduit de la loi d'Ampère : elle a été vérifiée directement pour les aimants.)

De cette équation on peut déduire une définition de l'unité de courant. Imaginons un courant de longueur s courbé en arc de cercle, dont le pôle soit le centre : la résultante comme les composantes sera perpendiculaire au plan de l'arc de cercle et sa valeur sera égale à la somme de celle des composantes. On aura alors :

$$F = \frac{m\, i\, s}{r^2}.$$

Si l'on fait dans cette équation : $F = 1$, $s = 1$, $r = 1$ et $m = 1$, il viendra : $i = 1$.

C'est-à-dire que l'unité de courant est le courant qui, traversant un arc de cercle de longueur 1 et de rayon 1, exercera sur un pôle magnétique d'intensité 1, placé en son centre, une force égale à l'unité[1].

214. Systèmes absolus de mesures électriques. — Il existe entre les grandeurs considérées en électricité statique et celles considérées en électricité dynamique certaines relations que nous avons indi-

1. Les dimensions de cette unité définie par

$$i = \frac{Fr^2}{ms}$$

sont, ainsi qu'il est aisé de le voir :

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

quées; de plus ces grandeurs sont reliées aux grandeurs mécaniques par la loi de Joule (149), par exemple.

Les grandeurs électriques que nous avons eu l'occasion de définir sont :

La quantité d'électricité (50) que nous désignerons par la lettre Q;
La différence de potentiel (63) ou force électromotrice (98) E;
La capacité électrique (93) C;
L'intensité d'un courant (104) I;
La résistance d'un conducteur (116) R.

Les relations qui existent entre ces quantités sont, en désignant par t le temps pendant lequel l'expérience est prolongée :

(93) $$Q = CE. \qquad (1)$$
(113) $$Q = It. \qquad (2)$$
(117) $$I = \frac{E}{R}. \qquad (3)$$

Nous avons dit (65) que le potentiel d'un corps mesure le travail mécanique correspondant au déplacement de l'unité d'électricité depuis l'infini jusqu'à la surface du corps. On en conclut que si l'on a deux corps de potentiels V et V', le travail nécessaire pour amener l'unité d'électricité de l'un à l'autre[1] sera précisément mesuré par V — V'. Si donc nous désignons par W (initiale du mot anglais *Work*, travail) le travail développé pour déplacer une quantité Q d'électricité entre deux corps ayant une différence de potentiel que nous désignons par E, on a :

$$W = QE = EIt. \qquad (4)$$

Cette relation est identique à celle que l'on déduirait de la loi de Joule (149); elle n'en diffère que par la forme, en ce que W y remplace $\frac{Qt}{H}$. Mais cette substitution est de droit, car le travail et les quantités de chaleur sont équivalentes; la quantité H est alors l'équivalent calorifique du travail mécanique. Son inverse $\frac{1}{H}$ est l'équivalent mécanique de la chaleur, 425 kilogrammètres pour 1 calorie.

Dans ces *quatre* équations, il entre, outre le temps et le travail mécanique qui sont absolument définis, *cinq* quantités Q,E,C,I,R : on voit dès lors que les unités qu'il faut prendre pour ces diverses

1. Il faudrait, en effet, un travail V pour amener l'unité d'électricité du corps V à l'infini (ou inversement). Mais, arrivé au corps de potentiel V', il faudrait fournir un travail V' pour aller jusqu'à l'infini; c'est donc que l'on n'en a dépensé que V — V' pour aller de l'un à l'autre corps.

grandeurs se trouvent déterminées dès que l'on a fixé l'une d'elles, si l'on veut que les unités se correspondent.

Il y a donc trois systèmes définis par ce que nous avons dit précédemment : dans le premier, dit système *électrostatique*, on définit l'unité de quantité d'électricité d'après la loi de Coulomb ; — dans le second, système *électrodynamique*, on se donnerait l'unité d'intensité de courant, d'après la formule d'Ampère (167) ; — enfin, dans le troisième, système *électromagnétique*, l'unité d'intensité est définie d'après la formule de l'action d'un pôle sur un courant.

A la suite de recherches et de discussions qui eurent lieu, tant dans une commission spéciale nommée par la British Association, qu'au Congrès des électriciens (Paris 1881), c'est ce dernier système qui a été adopté[1].

215. Unités pratiques d'électricité. — Les unités auxquelles on est conduit par l'adoption du système absolu que nous venons de définir (unités CGS de la British Association) sont de grandeurs trop extrêmes pour que l'on en puisse faire usage dans la pratique : on est donc convenu d'adopter un système d'unités pratiques qui ont été adoptées et dénommées définitivement au Congrès de Paris et qui se prêtent directement, en général, aux recherches expérimentales. Ces unités pratiques ont été choisies d'ailleurs de telle sorte qu'il existe entre elles les mêmes relations fondamentales que celles qui ont été indiquées entre les unités absolues (214) ; elles sont les suivantes.

L'unité pratique de la quantité d'électricité est le *Coulomb*, qui est la 10e partie de l'unité absolue CGS (10^{-1}) ; — l'unité pratique de force électromotrice est le *Volt*, qui vaut 10^8 unités absolues CGS ; — l'unité de capacité est le *Farad*, qui est 0,000 000 001 de l'unité absolue (10^{-9}) ; — l'unité d'intensité est l'*Ampère*, qui est la 10e

1. Sans vouloir entrer dans le détail de la discussion, nous indiquerons seulement la remarque suivante : la quantité d'électricité dans le système électrostatique est de dimensions

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}.$$

Dans le système électromagnétique, comme on a $Q = I\,t$, ses dimensions sont

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}.$$

Donc le rapport de ces deux grandeurs évaluées dans ces systèmes différents est LT^{-1}, c'est-à-dire de dimensions analogues à une vitesse.

partie de l'unité absolue (10^{-1}); — et l'unité de résistance est l'*Ohm*, qui vaut 10^9 unités absolues.

Il résulte de cela qu'il suffira de déterminer ces unités pratiques pour connaître par là même les unités absolues. C'est là une question qui s'impose afin qu'il soit possible de fixer, de déterminer les étalons, pièces matérielles auxquelles on pourra comparer ensuite les grandeurs sur lesquelles on opère, c'est-à-dire mesurer ces grandeurs.

Comme les unités pratiques ne répondent pas absolument par leur grandeur à tous les besoins, dans la pratique on emploie quelques multiples ou sous-multiples; ce sont :

Le *milli-ampère*, qui vaut 0,001 d'ampère;

Le *microfarad*, qui vaut 0,000 001 de farad;

Le *mégohm*, qui vaut 1 000 000 d'ohms.

Les relations qui existent entre les unités pratiques étant les mêmes que celles qui existent entre les unités absolues, on voit que l'on est conduit aux définitions suivantes :

Un condensateur de capacité égale à 1 farad prend un potentiel de 1 volt quand on le charge avec 1 coulomb.

1 ampère est l'intensité d'un courant correspondant au passage dans un conducteur de 1 coulomb en 1 seconde.

Une différence de potentiel de 1 volt aux extrémités d'un conducteur dont la résistance est de 1 ohm, produit un courant dont l'intensité est de 1 ampère.

Il est utile de commencer l'étude des mesures magnétiques et électriques par celle des comparaisons entre deux grandeurs de même nature sans rien préciser sur les unités adoptées; les indications fournies seront applicables également au cas où l'une des grandeurs sera l'unité, c'est-à-dire au cas de la mesure proprement dite.

Ce ne sera qu'ensuite qu'il sera possible d'indiquer comment on a pu procéder à la détermination des unités adoptées.

CHAPITRE II

MESURES MAGNÉTIQUES

216. Mesures magnétiques. — L'étude du magnétisme terrestre présente un intérêt réel : la connaissance de certains éléments, comme la déclinaison, est utilisée d'une manière constante dans la navigation, ainsi que nous le dirons plus tard, et la détermination de l'état magnétique de notre globe et de ses variations pourra conduire à en fixer les causes et à nous renseigner sur l'origine des courants électriques terrestres et peut-être sur celle de quelques phénomènes, comme les aurores boréales, qui semblent certainement être des manifestations magnétiques ou électriques.

L'état magnétique en un point du globe serait fixé absolument si l'on connaissait la grandeur et la direction de la force qui est appliquée à chacun des pôles d'un aimant déterminé. Il y a donc deux déterminations d'ordre différent : celle de la direction, qui est indépendante de l'aimant sur lequel on opère, et celle de l'intensité magnétique; nous les étudierons successivement.

La connaissance des données magnétiques est en outre nécessaire pour l'étude des mesures électriques, comme on le conçoit aisément, puisque les unités adoptées appartiennent au système électromagnétique (214). Pour cette question, les éléments relatifs à l'intensité sont seuls directement intéressants ; mais on ne peut les déterminer sans connaître au préalable les données qui caractérisent la position d'un aimant librement suspendu. C'est par cette détermination que nous commencerons.

217. Détermination de la direction du couple terrestre. — On ne peut, en réalité, lorsqu'il s'agit de mesures précises, employer un aimant librement suspendu par son centre de gravité; on

fixe par deux opérations différentes : 1° la position du plan du méridien magnétique; 2° la position par rapport à l'horizontale d'une aiguille aimantée mobile dans ce plan.

Nous avons dit (4) que le méridien magnétique s'écarte peu du méridien géographique; mais, en général, ces deux plans ne coïncident pas : leur angle dièdre est ce qu'on appelle la *déclinaison*. Cette déclinaison est *orientale* ou *occidentale* suivant que le *pôle nord* de l'aiguille supposée librement suspendue est à l'est ou à l'ouest du méridien géographique qui passe par le centre de l'aiguille.

La détermination de la déclinaison, qui est en réalité un angle dièdre, peut être ramenée à celle d'un angle plan, puisque cet angle dièdre est mesuré par l'angle que fait avec la méridienne du lieu où l'on se trouve une aiguille aimantée qui a été ramenée à l'horizontale (25), soit parce qu'elle est suspendue par un point convenablement choisi autre que son centre de gravité, soit parce que l'on a ajouté un contrepoids vers l'extrémité sud de l'aiguille.

Connaissant la déclinaison et l'inclinaison en un lieu, on a par là même la direction que prendrait une aiguille librement suspendue. Ainsi que nous l'avons dit (19), cette direction est celle qu'il faut supposer aux lignes de forces qui, également espacées, caractérisent le champ magnétique terrestre.

218. Mesure de la déclinaison. — Théoriquement, la mesure de la déclinaison est fort simple puisqu'il suffit de déterminer l'angle que fait avec la méridienne d'un lieu la ligne des pôles d'un aimant, d'une aiguille aimantée astreinte à se mouvoir dans un plan horizontal. Mais, dans la pratique, il se présente des difficultés de divers ordres, en ce qui concerne les aimants mêmes et abstraction faite de la fixation précise de la méridienne géographique.

Soit, en effet, une aiguille aimantée AB (fig. 140) mobile autour d'un point O, centre d'un cercle gradué sur lequel on a tracé la direction de la méridienne NS : si l'on suppose que l'axe de l'aiguille AB coïncide avec la ligne des pôles, la déclinaison est l'angle COA par exemple, et cet angle est donné immédiatement par la lecture de l'arc CA.

Mais en réalité la ligne des pôles peut ne pas coïncider avec la ligne AB, de telle sorte que ce n'est pas l'angle de NS avec AB qu'il s'agit de mesurer; et d'autre part la ligne des pôles peut ne pas passer par le centre du cercle, d'où résulte que l'angle cherché ne peut être mesuré par l'arc.

Considérons d'abord cette dernière cause; soient NS la direction

de la méridienne, MM′ celle du méridien magnétique et AB celle de la ligne des pôles, nécessairement parallèle à MM′, mais ne passant pas par le centre du cercle. La déclinaison étant l'angle des deux droites CD et AB est donnée par la demi-somme des arcs AC et BD. Dans tous les cas où des erreurs d'excentricité de ce genre sont à craindre, il faut donc faire deux lectures aux deux extrémités de la ligne mobile AB, et prendre la moyenne.

219. — Bien que les deux causes d'erreur puissent être aisément séparées, nous indiquerons comment on peut les corriger simul-

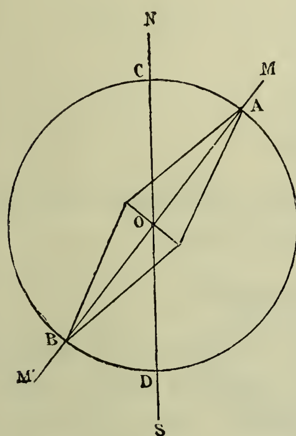


Fig. 140.

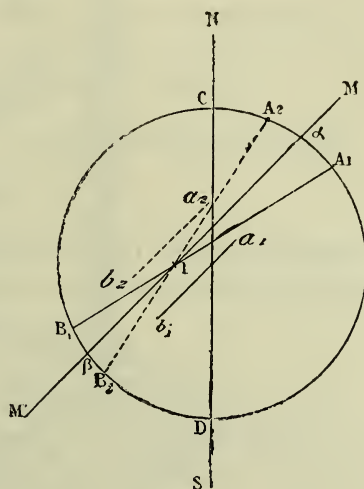


Fig. 141.

tanément l'une et l'autre. Soient NS (fig. 141) la direction de la méridienne géographique, I le centre de rotation de l'aiguille (O étant le centre du cercle), MM′ la direction du méridien magnétique. L'aiguille étant placée sur son support, la ligne des pôles a_1 b_1 se place parallèlement à MM′, et soit alors A_1 B_1 la direction de l'axe géométrique, A_1 et B_1 étant les extrémités des arcs qu'on lit sur le cercle. L'angle cherché δ a pour mesure

$$\frac{1}{2}(C\alpha + D\beta),$$

mais ces angles ne peuvent être observés, la ligne MM′ n'étant pas matérielle. Cette valeur peut s'écrire :

$$\delta = \frac{1}{2}(CA_1 - A_1\alpha + DB_1 - B_1\beta).$$

Supposons que l'on retourne l'aiguille, face pour face, de manière que la face qui regardait en l'air soit alors dirigée vers le bas (cette opération exige évidemment une chape destinée spécialement à cet effet et semblable des deux côtés) : la ligne des pôles viendra en $a_2\ b_2$, symétrique de $a_1\ b_1$ par rapport à MM', et l'axe géométrique prendra la position A_2B_2.

On aura encore :

$$\delta = \frac{1}{2}(C\alpha + D\beta) = \frac{1}{2}(CA_2 + A_2\alpha + DB_2 + B_2\beta),$$

et, en ajoutant ces deux valeurs,

$$2\delta = \frac{1}{2}(CA_1 + CA_2 + DB_1 + DB_2 + A_2\alpha - A_1\alpha + B_2\beta - B_1\beta).$$

Mais on a nécessairement :

$$A_1\alpha + B_1\beta = A_2\alpha + B_2\beta,$$

comme mesurant l'angle invariable de l'axe géométrique avec la ligne des pôles; donc, on a, toutes réductions faites :

$$\delta = \frac{1}{4}(CA_1 + DB_1 + CA_2 + DB_2).$$

Pour obvier aux inconvénients signalés, lorsque l'on voudra mesurer la déclinaison, il faudra faire une lecture à chaque extrémité de l'aiguille mise en expérience; retourner cette aiguille face pour face; faire une lecture à chaque extrémité; la moyenne des quatre lectures (le quart de la somme) donne la valeur exacte de la déclinaison.

Les appareils qui permettent de déterminer cette donnée ont reçu, d'une manière générale, le nom de *boussoles de déclinaison*.

220. Boussoles de déclinaison. — La détermination de la déclinaison peut être faite à l'aide de divers appareils : nous décrirons seulement les principaux.

La boussole de Gambey comprend un cercle horizontal gradué, porté sur un trépied muni de vis calantes et de niveaux à bulle d'air. Sur ce cercle, et autour de l'axe vertical qui passe par son centre, peut tourner un système formé essentiellement de deux colonnes verticales parallèles invariablement liées l'une à l'autre par la base sur laquelle elles sont fixées et par une traverse placée à la partie supérieure. La base est munie d'une alidade portant un vernier qui vient glisser sur le cercle gradué et permet d'évaluer les déplacements de la partie mobile.

La traverse supérieure, dans laquelle est pratiquée une ouverture vers sa partie médiane, supporte un petit treuil sur lequel s'enroule un paquet de fils de cocon qui à sa partie inférieure porte un étrier dans lequel on place le barreau aimanté, qui est assez long. Il présente à ses extrémités deux cercles en cuivre portant un réticule formé de deux fils fins en croix : c'est la ligne qui joint les croisées

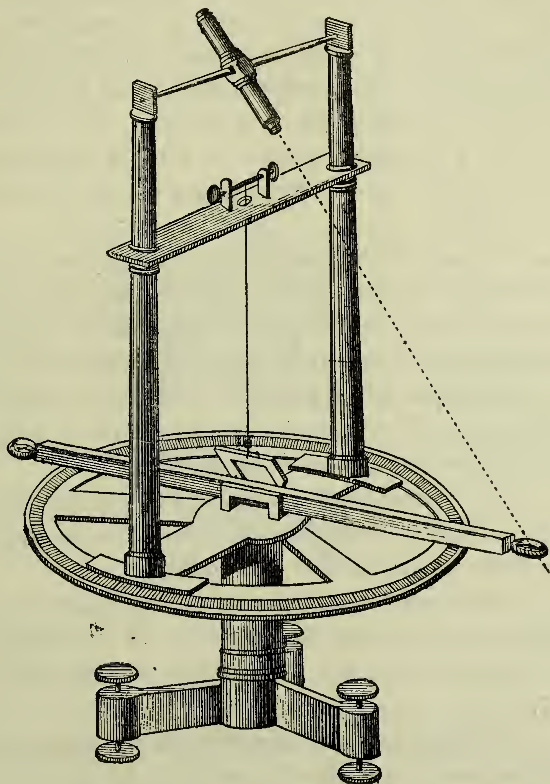


Fig. 142. — Boussole de Gambey.

des fils des réticules qui constitue l'axe géométrique du barreau aimanté.

Les colonnes, au-dessus de la traverse horizontale, supportent une lunette qui peut tourner autour d'un axe horizontal auquel elle est perpendiculaire. Cette lunette est disposée pour viser les objets éloignés ; mais, par l'addition d'une lentille convergente complémentaire sur l'objectif, elle peut viser aussi les objets à petite distance.

Il est facile de comprendre le fonctionnement de cette boussole :

le barreau étant en équilibre, sans torsion du fil, on vise les extrémités avec la lunette munie de la lentille complémentaire ; on fait alors une lecture à l'alidade, ce qui détermine la position de l'axe du barreau. Il va sans dire, que, en réalité, on fait quatre lectures, comme nous venons de le dire et que c'est la moyenne de ces quatre lectures qui donne le chiffre à conserver.

La lentille complémentaire étant enlevée, on dirige la lunette vers une mire fixe qui sert à déterminer le méridien géographique, mire qui est établie une fois pour toutes dans les observatoires où l'on fait des observations magnétiques. Pour faire cette visée, il faut faire tourner la lunette, avec son support, d'un certain angle : une lecture faite à l'alidade, comparée avec la lecture précédemment obtenue, donne la mesure de cet angle qui est précisément la déclinaison cherchée.

Si l'on n'a pas la direction du méridien géographique matériellement déterminée à l'avance, on vise avec la lunette un astre connu et l'on note l'heure de son passage devant le réticule. Les tables astronomiques et la résolution d'un triangle sphérique permettent de trouver l'angle que fait le plan qui contient cet astre avec le méridien géographique, et par suite de comparer le plan qui contient l'axe du barreau aimanté avec ce méridien.

Pour éviter l'influence des courants d'air, le barreau est placé dans une boîte en bois présentant des parties vitrées pour permettre de viser les réticules portés aux extrémités.

Pour s'assurer que le barreau est en équilibre sans que les fils de suspension soient tordus, on l'enlève et on le remplace par un barreau de cuivre ; il faut que sa direction soit la même que celle de l'aimant.

221. — A l'observatoire de Montsouris, on se sert, pour la mesure de la déclinaison, du théodolite-boussole de Brunner (fig. 143). Cet appareil comporte, comme tout théodolite, deux cercles gradués, un horizontal et un vertical, ce dernier mobile autour de la verticale qui passe par le centre du premier. Une lunette, destinée à l'observation des astres ou des mires éloignées déterminant le méridien, se meut parallèlement au plan du cercle vertical.

D'autre part, un microscope muni d'un réticule est lié invariablement à la lunette avec laquelle il tourne : les axes des deux instruments sont parallèles. A l'aide de ce microscope on vise les extrémités d'un petit barreau aimanté, renfermé dans une caisse cylindrique fermée par des glaces parallèles et suspendu par un fil de cocon. A chaque extrémité se trouve un disque d'argent sur

lequel est un trait vertical qui constitue l'extrémité de l'axe géométrique du barreau. Enfin, le fil de suspension peut être repéré à l'aide de vis, à la partie supérieure, de manière que le centre de rotation du barreau soit exactement dans le plan décrit par l'axe du microscope.

Comme on fait une lecture à chaque extrémité, il n'est pas nécessaire que l'axe du microscope soit rigoureusement parallèle au plan du cercle gradué, et on élimine l'erreur qui résulterait de ce défaut de parallélisme en prenant la moyenne des deux lectures.

L'opération se fait d'ailleurs de la même façon que pour la boussole de Gambey : on vise la mire méridienne avec la lunette et on

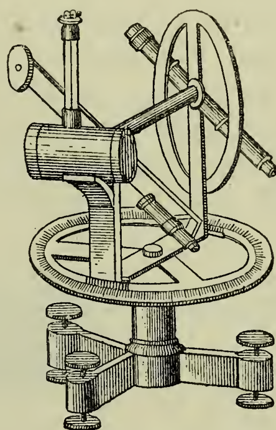


Fig. 143. — Théodolite-boussole.

fait une lecture sur l'alidade; on vise alors le barreau aimanté avec le microscope et l'on fait une seconde lecture sur l'alidade. La différence des deux lectures, qui fait connaître l'angle dont l'appareil a tourné, mesure la déclinaison.

222. Boussole des variations en déclinaison. — L'observation montre que l'aiguille aimantée suspendue n'est jamais en repos, ce qui revient à dire que la déclinaison varie constamment. L'étude de ces variations est importante au point de vue du magnétisme terrestre : on emploie pour les mettre en évidence, les mesurer, un appareil plus simple que les boussoles précédentes qui permettent de mesurer la valeur absolue de la déclinaison. Ces boussoles des variations comprennent d'une manière générale un barreau aimanté suspendu à un fil sans torsion et portant un miroir sur lequel vise

une lunette placée à quelque distance et dans lequel on voit, par cette lunette, l'image d'une règle graduée placée transversalement à la lunette et à son pied (fig. 144). Si le barreau aimanté était immobile, on verrait toujours la même division de la règle en coïncidence avec le réticule ; mais, au contraire, si le barreau se déplace, il entraînera le miroir, et ses divisions successives passeront devant ce réticule. Du nombre de ces divisions dont on connaît la grandeur et de la distance du miroir à la règle, on déduit facilement l'angle dont le barreau a tourné [1].

Quelquefois on emploie une disposition différente dans la forme, mais analogue au fond : une source de lumière, une lampe à pétrole

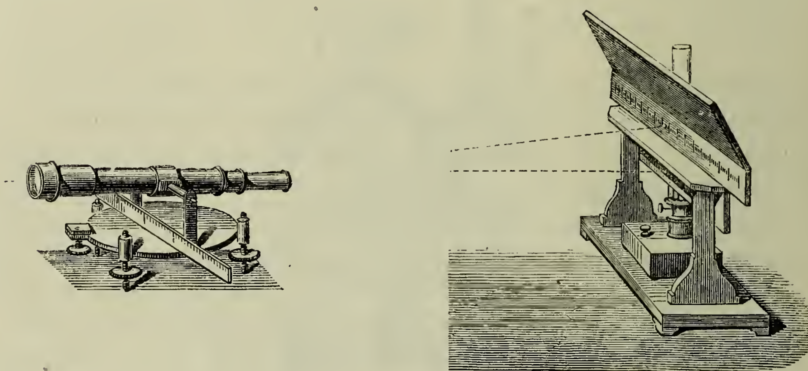


Fig. 144 et 145. — Viseurs à règle divisée. (*Ducretet.*)

généralement, placée derrière un écran envoie, à travers une fente, un faisceau de lumière dans une direction invariable sur le miroir (fig. 145). Celui-ci est convergent et renvoie le faisceau réfléchi de manière à donner une image réelle sur une règle divisée placée en avant et au-dessus de la règle ; ce sont les déplacements de cette image que l'on observe. Si le miroir est plan, il faut placer une lentille convergente sur le trajet du faisceau lumineux.

223. — Dans la boussole des variations employée à l'observatoire de Montsouris, on trouve tous les éléments que nous venons d'indiquer : le barreau qui a 96 millimètres de longueur sur 10 de

1. Cette disposition se présentant fréquemment, il est utile d'indiquer comment se fait cette détermination. Soient L la lunette (fig. 146), HK la règle

hauteur et 2 d'épaisseur, se meut dans une caisse de cuivre rouge sans fond qui a pour effet d'amortir les oscillations (195).

L'appareil est très délicat et il faut éviter de nombreuses causes de perturbation, telles que les courants d'air, les effets de torsion ou de détorsion des fils dus à des changements dans leur état hygrométrique. Des précautions multiples doivent être prises, mais nous ne pouvons entrer dans leur détail.

Il va sans dire que, pour l'étude de la déclinaison, comme pour celle des autres éléments du magnétisme terrestre, il faut éviter toutes les actions magnétiques qui proviendraient de fer en masses plus ou moins considérables placées dans le voisinage des appareils. Aussi les appareils doivent-ils être placés dans des pavillons construits spécialement et dans la construction desquels il n'entre pas de fer. Ces pavillons doivent être aussi éloignés que possible des autres bâtiments et il faut s'assurer, par des mesures comparatives, s'il n'existe pas de causes perturbatrices locales qu'il faudrait évaluer et dont on aurait à tenir compte pour toutes les observations. Enfin, d'une manière générale, le laiton est exclu des appareils,

M et M′ les positions du miroir avant et après la déviation ; soit encore α l'angle MIM′ dont a tourné le miroir, et l la distance qui sépare du zéro de

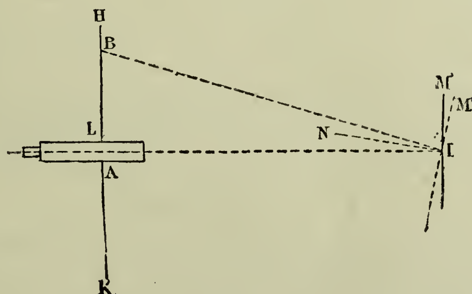


Fig. 146.

la règle divisée la division B dont on voit l'image. On sait que dans ces conditions l'angle BIA est égal à 2α. On a donc immédiatement, en appelant D la distance AI,

$$\text{Tg}\, 2\alpha = \frac{l}{D}$$

d'où l'on déduira α.

parce qu'il est difficile que le zinc qui entre dans la composition de cet alliage ne contienne pas un peu de fer.

On se sert également de boussoles à aiguilles horizontales dans la navigation et les voyages divers ; mais elles n'ont pas pour but de déterminer la déclinaison. Au contraire, il faut supposer la déclinaison connue et alors ces appareils, ces compas, comme on les appelle dans la marine, permettent de retrouver une direction déterminée.

Nous reviendrons, dans la partie des applications, à cette importante question, en même temps que nous signalerons les résultats généraux des études faites sur le magnétisme terrestre.

224. Mesure de l'inclinaison. — L'inclinaison est l'angle que fait avec l'horizontale une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité et susceptible de se mouvoir dans le plan du méridien magnétique (4). Comme il est difficile d'avoir une aiguille mobile absolument autour d'un point, on l'assujettit à tourner autour d'un axe horizontal perpendiculaire au plan du méridien magnétique, ce qui revient au même.

Nous indiquerons plus loin comment on satisfait à cette condition que l'aiguille soit mobile dans le plan du méridien magnétique ou comment on arrive à l'éliminer, et nous examinerons d'abord les difficultés qui se présentent lorsque l'aiguille étant mobile dans un plan quelconque on veut déterminer la direction de l'action magnétique, c'est-à-dire la direction que prend la ligne des pôles.

Il y a évidemment tout d'abord à tenir compte de l'erreur d'excentricité et de la non-coïncidence de l'axe géométrique avec la ligne des pôles. Mais, à cet égard, nous aurions à répéter ce que nous avons dit à propos de la déclinaison et nous arriverions à reconnaître que l'on élimine ces erreurs par des lectures faites chaque fois aux deux extrémités de l'aiguille et par un retournement face pour face.

Mais il est une autre cause d'erreur provenant de ce que, l'aiguille n'étant pas soutenue rigoureusement par son centre de gravité, son poids intervient pour déterminer la position d'équilibre, et que l'angle qu'elle fait avec l'horizontale dépend de ce point. On peut démontrer qu'il est possible d'éliminer aussi cette erreur par un retournement d'une autre nature. Après avoir déterminé la position de l'aiguille aussi exactement que possible, on la désaimante et on l'aimante en sens contraire : l'aiguille remise sur son pivot prend une position telle que le centre de gravité est évidemment placé dans une situation inverse de celle qu'il occupait d'abord par rapport à l'horizontale. On comprend dès lors que l'influence du

poids de l'aiguille se fasse sentir en sens contraire. On fait une nouvelle détermination précise de la position de l'aiguille dans ces circonstances (ce qui fait 4 nouvelles mesures, soit 8 en tout), et des formules permettent de déduire exactement l'angle que, dans le plan considéré, la ligne des pôles fait avec l'horizontale[1].

1. Soit, dans le plan où se meut l'aiguille HH' (fig. 147), l'horizontale du centre de rotation O, XY la direction de l'action magnétique dont la valeur sur chacun des pôles de l'aiguille AB est F_1; soit aussi P le poids de l'aiguille appliqué au centre de gravité G. Appelons enfin i et φ_1, les angles XOH et BOH, l la demi-longueur de l'aiguille et d la distance OG du centre de gravité au centre de rota-

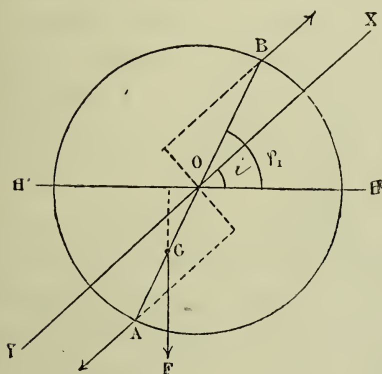


Fig. 147.

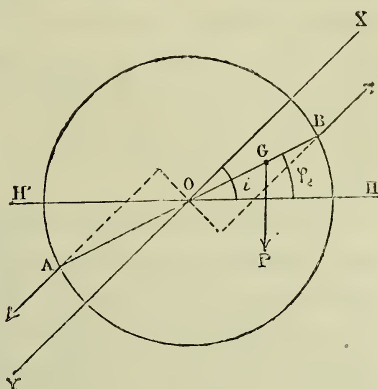


Fig. 148.

tion. Si nous appliquons l'équation des moments à la position pour laquelle l'équilibre existe, nous aurons :

$$2F_1.l \sin(\varphi_1 - i) - Pd \cos \varphi_1 = 0.$$

Lorsque l'aiguille aura été aimantée en sens contraire, elle prendra la position AB (fig. 148), se retournant d'elle-même, et soit φ_2 l'angle que fait, au moment de l'équilibre, la ligne des pôles avec l'horizontale. Soit F_2 la valeur de l'action magnétique, qui peut n'être pas la même que précédemment; nous aurons une équation analogue :

$$2F_2 l \sin(i - \varphi_2) - Pd \cos \varphi_2 = 0.$$

On peut facilement éliminer Pd entre ces deux équations et il reste une relation qui donne i en fonction de φ_1, φ_2 et du rapport $\frac{F_1}{F_2}$. On a, en effet, en divisant :

$$\frac{F_1 \sin(\varphi_1 - i)}{F_2 \sin(i - \varphi_2)} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2}$$

d'où, en réduisant :

On voit que l'opération est très complexe en réalité, puisqu'elle comprend, en sus de *huit* lectures, la désaimantation et la réaimantation de l'aiguille, plus une mesure des intensités magnétiques pour s'assurer si elles sont égales dans les deux cas et, si elles ne le sont pas, pour déterminer leur rapport.

225. Boussole d'inclinaison. — En principe les appareils qui servent à la mesure directe de l'inclinaison ne diffèrent que par une construction plus soignée et par la possibilité de mesures plus exactes de l'appareil élémentaire que nous avons décrit (27). La boussole d'inclinaison absolue employée à l'observatoire de Montsouris a été construite par les frères Brunner (fig. 149); elle consiste en un cercle gradué horizontal reposant sur trois vis calantes et muni de niveaux. Au centre se trouve un axe vertical autour duquel se meut la boussole proprement dite qui comprend un cercle vertical, l'aiguille et des microscopes : une alidade munie de verniers permet de déterminer avec une grande exactitude les déplacements azimutaux du cercle vertical.

L'aiguille, d'une longueur de 402 millimètres, est terminée à ses deux extrémités par des pointes fines sur lesquelles on peut viser directement : elle repose sur deux plans d'agate par deux tourillons de 1 millimètre de diamètre environ. Des fourchettes mues par une tige permettent de soulever ces tourillons et de les reposer doucement sur ce plan d'agate.

Des microscopes fixés à l'extrémité d'alidades mobiles autour d'un axe situé sur le prolongement de l'axe de rotation permettent de viser directement chacune des deux pointes. Comme il est difficile d'observer l'aiguille à l'état de repos, un micromètre est placé au foyer et permet d'évaluer l'amplitude des petites oscillations et d'en déduire la position moyenne de l'aiguille. A chacune de ces alidades est relié un vernier qui se meut sur un cercle gradué concentrique et permet d'apprécier avec une grande exactitude la position du microscope et par suite celle de la pointe de l'aiguille que l'on a visée. Autrement dit, au lieu de déterminer la direction de

$$\operatorname{tg} i = \frac{F_1 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + F_2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_1}{(F_1 + F_2) \cos \varphi_1 \cos \varphi_2}.$$

Dans le cas où l'aiguille a été aimantée également dans les deux opérations, on a $F_1 = F_2$ et l'équation, se simplifiant, devient :

$$\operatorname{tg} i = \frac{1}{2} (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2).$$

l'axe de l'aiguille par l'observation directe des positions des pointes sur un cercle divisé, on note les positions des microscopes à l'aide desquels on vise ces pointes.

Comme nous l'avons dit, on fait, pour chaque observation, une lecture à chaque extrémité de l'aiguille pour une position donnée du plan d'oscillation; on fait deux autres lectures analogues après

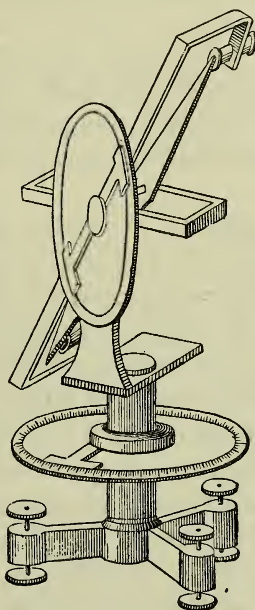


Fig. 149. — Boussole d'inclinaison.

avoir fait tourner l'appareil entier de 180° (ce qui revient au même résultat que de tourner simplement l'aiguille sur ses supports); les 4 lectures ont pour effet d'éliminer les erreurs de centrage et de la non-coïncidence de l'axe géométrique et de l'axe magnétique.

On désaimante alors l'aiguille pour la réaimanter en sens contraire : cette opération se fait en plaçant l'aiguille dans un solénoïde qui est traversé par un courant assez intense et en la faisant passer un certain nombre de fois dans ce solénoïde toujours dans le même sens. L'expérience montre le nombre de passes nécessaires pour désaimanter l'aiguille et l'aimanter à saturation en sens contraire.

On recommence alors les opérations précédemment indiquées et l'on fait ainsi 4 nouvelles lectures.

226. — On peut, ainsi que la théorie l'indique, déterminer l'inclinaison directement par une mesure faite dans le plan du méridien

magnétique, ou par une mesure faite dans un plan quelconque en tenant compte de l'azimut de ce plan par rapport au méridien magnétique, ou par deux mesures faites dans deux azimuts rectangulaires quelconques (26, note).

Une discussion détaillée des conditions expérimentales montre que c'est la mesure faite dans le méridien magnétique qui présente la plus grande exactitude; aussi est-ce celle qui est le plus généralement employée.

Pour fixer la boussole dans ce plan, on s'appuie sur ce que l'inclinaison a la même valeur pour deux azimuts également inclinés sur le méridien magnétique et que, réciproquement, cette condition suffit à déterminer deux plans également inclinés sur le méridien magnétique.

Ceci posé, les microscopes étant presque sur la verticale, on fait tourner le cercle vertical jusqu'à ce que la pointe de l'aiguille apparaisse dans le champ du microscope et on le fixe dans cette position. On lit alors de combien de divisions du micromètre elle est éloignée du zéro, d'une part; et, d'autre part, on fait sur le cercle horizontal une lecture qui détermine la position du cercle vertical. On tourne alors complètement l'appareil jusqu'à ce que la pointe de l'aiguille revienne exactement dans la même position par rapport au zéro du micromètre, mais de l'autre côté relativement à l'observateur (c'est-à-dire, en réalité, du même côté puisque l'observateur a dû changer de côté avec le cercle même); on fait une lecture à l'alidade du cercle horizontal. On détermine par différence l'angle dont a tourné le cercle vertical et l'on calcule aisément la position qui correspond à la bissectrice de cet angle; c'est à cette position déterminée par l'alidade du cercle horizontal que l'on fixe le cercle vertical pour faire les opérations que nous avons indiquées et qui conduisent à la détermination de l'inclinaison.

227. — On étudie les variations de l'inclinaison à l'aide d'un appareil qui présente les mêmes dispositions générales que la boussole d'inclinaison absolue; seulement, comme on ne change pas le sens de l'aimantation de l'aiguille, celle-ci est portée, non sur des tourillons cylindriques, mais sur des couteaux.

Théoriquement, le plan dans lequel se meut l'aiguille devrait coïncider avec le méridien magnétique et l'on devrait faire tourner l'appareil pour suivre les variations de la déclinaison. Dans la pratique, on reconnaît facilement que l'influence de ces variations est négligeable et l'aiguille peut rester dans le méridien magnétique moyen.

On peut obtenir la valeur de l'inclinaison d'une manière indirecte en mesurant la variation en déclinaison, par une méthode qui paraît due à Bergmann et qui est employée dans divers appareils.

Soit une aiguille de déclinaison *ns* (fig. 150) qui s'est arrêtée dans le plan du méridien magnétique ; dans un plan perpendiculaire, et de part et d'autre à la même distance, on place verticalement deux barreaux de fer doux, de telle sorte que l'extrémité inférieure de l'un B et l'extrémité supérieure de l'autre A soient dans le plan horizontal qui contient l'aiguille. Ces barreaux s'aimantent sous l'influence de la terre et présentent un pôle sud à la partie inférieure, un pôle nord

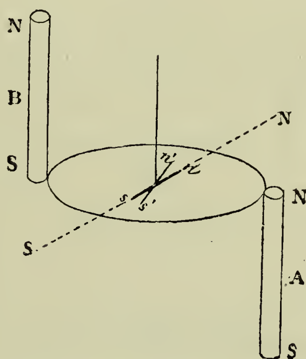


Fig. 150.

à la partie supérieure. Sous leur influence, l'aiguille sera déviée en *n's'* d'un angle δ : le couple dû à l'action terrestre lors de l'équilibre est proportionnel à $h \sin \delta$ (h, valeur de la composante horizontale terrestre), c'est-à-dire à $H \cos i \sin \delta$, H représentant l'action terrestre. Le couple déviant, dû à l'action des barreaux auxiliaires, est proportionnel à la composante verticale terrestre $V = H \sin i$.

On a donc l'équation :

$$H \cos i \sin \delta = KH \sin i.$$

K étant une constante dépendant de l'appareil seulement. On en déduit :

$$\text{tg}\, i = \frac{1}{K} \sin \delta.$$

Le coefficient K est donné en introduisant dans cette équation la valeur de l'inclinaison déterminée directement par une boussole

d'inclinaison et mesurant en même temps l'angle δ. Il est bon d'ailleurs de vérifier de temps à autre que cette valeur ne s'est pas modifiée.

En réalité, les mesures sont plus complexes : pour tenir compte du magnétisme rémanent des barreaux de fer doux, notamment, il est nécessaire d'opérer des retournements.

228. Mesure de l'intensité magnétique. — On ne détermine pas généralement la valeur totale de l'intensité absolue; le plus souvent on mesure la composante horizontale et, connaissant l'inclinaison, on en déduit l'intensité totale,

$$H = \frac{h}{\cos i}.$$

Quelquefois on mesure la composante verticale v et, connaissant l'inclinaison, on a alors :

$$H = \frac{v}{\sin i}.$$

Enfin, on peut trouver l'intensité totale connaissant les deux composantes :

$$H = \sqrt{v^2 + h^2}.$$

Nous avons donc à signaler les principaux moyens employés pour mesurer l'une et l'autre de ces composantes.

229. Magnétomètre de gauss. — L'intensité de la force ma-

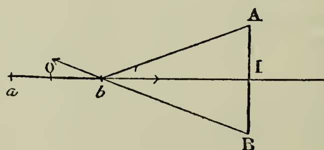


Fig. 151.

gnétique terrestre peut être mesurée à l'aide de plusieurs appareils différents : nous décrirons le plus important, le *magnétomètre de Gauss* qui permet de mesurer avec précision la valeur de la composante horizontale de cette force magnétique.

Le magnétomètre de Gauss est basé sur le principe suivant : soit un aimant *ab* (fig. 151) placé dans la direction du méridien magnétique; perpendiculairement à sa direction et à une distance *d*

on place un barreau aimanté AB relativement long; le premier barreau subit une déviation δ qui est donnée par la formule

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\mu}{H} \cdot \frac{1}{d^3} + C \cdot \frac{1}{d^5},$$

dans laquelle μ est le moment magnétique du barreau AB, H la composante magnétique terrestre et C une constante[1].

Si l'on fait une seconde observation à la distance d', on aura de même

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{\mu}{H} \cdot \frac{1}{d'^3} + C \cdot \frac{1}{d'^5},$$

et entre ces deux équations on pourra éliminer C; on connaîtra donc $\frac{\mu}{H}$, valeur que nous désignerons par P.

D'autre part, le barreau aimanté librement suspendu dans une chape et dévié de sa position d'équilibre exécute des oscillations dont on détermine la durée t. La formule du pendule composé est applicable alors et l'on a :

$$t = \pi \sqrt{\frac{I}{\mu H}}$$

dans laquelle I est le moment d'inertie du système oscillant. Si sa valeur est supposée connue, cette équation donne la valeur de $\mu H = Q$. On voit immédiatement alors que l'on a :

$$\mu^2 = PQ \text{ et } H^2 = \frac{Q}{P}.$$

1. Soit ab (fig. 151) le barreau mobile en O dont nous considérons la longueur comme négligeable par rapport à la distance bI que nous désignerons par d; soit AB le barreau fixe dont $2l$ est la longueur. L'action de AB sur ab se réduira à un couple, puisque nous négligeons la longueur ab par rapport à OI; il nous suffira donc d'étudier l'action de AB sur le pôle b. Ce pôle subit une attraction de A et une répulsion de B; ces deux forces sont égales et si l'on appelle m et M les quantités de magnétisme supposées condensées en ces pôles, chacune de ces forces est égale à

$$\frac{m\,M}{l^2 + d^2}.$$

Ce pôle subit en outre l'action de la terre et la force correspondante est m H. Si donc on appelle R la valeur de la résultante de ces trois forces et δ l'angle qu'elle fait avec la ligne OI, on aura en projetant successivement sur cette ligne OI et sur une perpendiculaire

$$R \cos \delta = qH.$$

$$R \sin \delta = \frac{2mM}{l^2 + d^2} \operatorname{Sin} AbI = \frac{2mMl}{(l^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}$$

En réalité, la formule qui donne t doit être un peu modifiée parce que, la suspension se faisant à l'aide d'un fil de cocon, il y a lieu de tenir compte de la force résultant de la torsion : la correction, pour être petite, n'est pas négligeable.

230. — L'opération effective comprend une série de déterminations que nous allons indiquer successivement.

La détermination des valeurs de δ et δ' se fait à l'aide de la boussole des variations en déclinaison à laquelle est adjointe une règle divisée dirigée dans le méridien magnétique et sur laquelle on place, à des distances différentes d et d', le barreau aimanté sur un chariot spécialement disposé à cet effet. Les déviations sont déterminées par l'emploi du viseur et du miroir (222).

Pour éviter les erreurs provenant d'un manque de symétrie dans l'appareil, on fait les mesures de ces angles dans 4 positions différentes, l'aimant étant placé à droite ou à gauche de la boussole d'une part; puis d'autre part on retourne, pour chaque position, le barreau bout pour bout. Enfin, comme l'aiguille de la boussole n'arrive jamais à l'équilibre, on lit les positions extrêmes correspondant à 10 oscillations et on prend la moyenne.

La détermination de $Q = \mu H$ suppose la connaissance du moment d'inertie I que l'on ne peut évaluer directement à cause de l'existence de la chape (le moment d'inertie d'un barreau prismatique se calcule facilement, au contraire). Pour déterminer sa valeur, on emploie un procédé général : on ajoute, au système, dans des positions bien déterminées, un corps non magnétique dont on a calculé le moment d'inertie I' et l'on mesure la durée les oscillations t'

La direction de cette résultante est celle que prendra l'aiguille lors de la déviation et l'on a :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2Ml}{(l^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu}{H}(l^2 + d^2)^{-\frac{3}{2}} = \frac{\mu}{H} \cdot \frac{1}{d^3}\left(1 + \frac{l^2}{d^2}\right)^{-\frac{3}{2}}$$

car $2Ml$ est précisément le moment magnétique du barreau AB.

En développant la parenthèse et remarquant que le terme $\frac{l}{d}$ étant petit on peut négliger les puissances supérieures de $\frac{l^2}{d^2}$, il vient :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\mu}{H} \cdot \frac{1}{d^3} - \frac{3}{2} \frac{\mu l^2}{H} \cdot \frac{1}{d^5}$$

Le terme $-\frac{3}{2} \frac{\mu l^2}{H}$ est ce que nous avons désigné par C, ci-dessus.

dans ces nouvelles circonstances. On a alors, toujours d'après la formule du pendule composé,

$$t' = \pi \sqrt{\frac{I + I'}{\mu H}}.$$

Entre cette équation et celle qui donne t, on peut alors éliminer la valeur inconnue I [1].

231. Magnétomètre bifilaire. — Lorsqu'un corps pesant est suspendu à deux fils sans torsion placés parallèlement à une certaine distance, l'équilibre s'établit lorsque les deux fils sont placés dans un même plan vertical; mais si alors un couple vient à agir sur ce corps horizontalement, ou présentant au moins une composante horizontale, le corps tourne et les fils sont déviés de la verticale, en sens contraires. Cette déviation des fils tend à ramener le système à sa position primitive et l'on démontre que le couple qui agit alors est proportionnel au sinus de l'angle de déviation, au poids de l'appareil, au carré de la distance qui sépare les deux fils et en raison inverse de leur longueur commune. Si les variations de l'angle de déviation sont très petites, les variations du couple pourront être prises comme mesurées par ces variations de l'angle.

En un mot, dans ce système de suspension, les conditions sont analogues à celles d'une balance de torsion, avec ces différences que le poids du corps suspendu intervient, ce qui n'existe pas dans la balance de torsion, et que l'on peut faire varier le couple qui tend à ramener le système à la position d'équilibre, et conséquemment la sensibilité de l'appareil, en faisant varier la distance des fils.

Considérons un barreau aimanté assez lourd, porté par un système bifilaire, dont les points de suspension supérieurs, invariablement liés l'un à l'autre, sont portés par un tambour que l'on peut faire tourner autour d'un axe vertical. Si la ligne qui joint les points de suspension est dans le plan du méridien magnétique, elle

1. Les deux équations élevées au carré et retranchées l'une de l'autre donnent :

$$t'^2 - t^2 = \pi^2 \frac{I'}{\mu H}$$

d'où l'on tire

$$Q = \mu H = \frac{\pi^2 I'}{t'^2 - t^2}.$$

sera parallèle à l'axe du barreau et les fils de suspension seront l'un et l'autre verticaux. Faisons alors tourner le tambour supérieur, les fils s'écarteront de la verticale, en sens contraire, et tendront à entraîner le barreau dans le sens de la rotation du tambour; le barreau se déplacera, mais moins rapidement que le tambour. En continuant la rotation du tambour, on pourra amener le barreau à être perpendiculaire au plan du méridien magnétique. A cet instant, le couple provenant de l'action du bifilaire aura un moment égal au moment provenant de l'action terrestre, moment qui a pour valeur μh, h étant la valeur de la composante horizontale de l'action terrestre et μ le moment magnétique du barreau.

Si la valeur de l'intensité terrestre vient à changer, l'équilibre ne pourra plus subsister : si h diminue, l'action du bifilaire l'emportera et le barreau s'écartera plus de sa position normale d'équilibre; le déplacement sera inverse, si la valeur de h s'accroît. Toute variation de h correspondra donc à un déplacement du barreau et réciproquement.

En réalité, ces déplacements sont très petits, parce que h ne varie que d'une petite fraction de sa valeur, et pour les apprécier et les mesurer on emploie la lunette visant sur un miroir fixé sur le barreau. On conçoit que, grâce à une comparaison préalable, on puisse déduire des variations de l'angle les variations de la force h[1].

Il est aisé de comprendre qu'un effet analogue se produirait quelle que fût la direction du barreau en dehors du méridien magnétique, ce qui entraînerait nécessairement une torsion du bifilaire : toute variation dans l'intensité amènerait un déplacement du bar-

1. Le moment du couple bifilaire a pour valeur $\frac{2Pr^2}{L}\sin\alpha$; dans cette formule, P est le poids du barreau, r la demi-distance des fils, L leur longueur et α l'angle que fait la droite qui joint les points de suspension supérieurs avec la direction du barreau. Puisqu'il y a équilibre, le barreau étant perpendiculaire au méridien magnétique, on a :

$$\mu h = \frac{2Pr^2}{L}\sin\alpha = A\sin\alpha. \tag{1}$$

$\frac{2Pr^2}{L}$ est une constante pour un même appareil, nous la désignons par A. Si h varie de Δh, α variera de $\Delta\alpha$, et l'on aura de même :

$$\mu(h + \Delta h) = A\sin(\alpha + \Delta\alpha).$$

D'où, en retranchant :

reau. Mais l'influence de la variation sera maxima si le barreau est perpendiculaire au méridien magnétique, parce que c'est pour cette position que le bras de levier du couple terrestre est le plus grand possible[1].

Cet appareil est surtout destiné à mesurer les variations en intensité : il permet de contrôler, par conséquent, les mesures directes d'intensité dont on a déterminé les valeurs absolues à l'aide du magnétomètre de Gauss.

232. Magnétomètre balance. — Considérons un barreau aimanté supporté horizontalement par un couteau reposant sur un plan d'agate et fixé exactement sur la verticale du centre de gravité; à l'aide de pièces non magnétiques, ce centre de gravité est amené assez bas pour que l'équilibre soit stable. Nous savons (24) que pour ramener ce barreau à l'horizontalité il faut lui appliquer du côté sud (dans notre hémisphère) un poids déterminé dont la valeur dépend de la valeur de l'intensité magnétique. Si celle-ci vient à changer, l'horizontalité ne pourra pas être conservée et le fléau s'inclinera : l'inclinaison au moment de l'équilibre dépendra de la variation subie par l'intensité ; on comprend donc que de la connais-

$$\mu\Delta h = A.2 \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \cos \alpha. \qquad (2)$$

Divisant l'équation (2) par l'équation (1) et remarquant que, les variations étant très petites, on a sensiblement

$$2 \sin \frac{\Delta\alpha}{2} = \Delta\alpha.$$

il vient

$$\frac{\Delta h}{h} = \operatorname{cotg} \alpha . \Delta\alpha$$

ce qui donne le rapport de la variation d'intensité à l'intensité même.

1. Si le barreau faisait un angle ω avec le méridien magnétique, le moment du couple terrestre serait $\mu h \sin \omega$: les équations précédentes changeraient par la substitution de cette valeur à μh et notamment, de l'équation (2), on déduirait, en remplaçant $2 \sin \frac{\Delta\alpha}{2}$ par $\Delta\alpha$:

$$\Delta\alpha = \frac{\mu\Delta h \sin \omega}{A \cos \alpha}.$$

Pour une même variation Δh, $\Delta\alpha$ variera avec $\sin \omega$ et sera maxima quand on aura $\omega = 90°$ et par suite $\sin \omega = 1$.

sance de l'angle que le fléau fait avec l'horizontale, on puisse déduire cette variation de l'intensité[1].

233. Comparaison des moments magnétiques. — La connaissance du moment magnétique d'un barreau aimanté est utile dans diverses circonstances : la connaissance du rapport des moments magnétiques de deux barreaux est plus souvent nécessaire. Nous allons indiquer comment on peut procéder à cette détermination après avoir précisé ce que l'on entend par *moment magnétique d'un barreau* (17).

Soit une aiguille aimantée, de longueur $2l$ entre les pôles, placée perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison : elle sera soumise à l'action du couple terrestre (22). Si f est l'action d'une des forces qui constituent ce couple, le moment sera $2fl$. Mais la force f dépend de l'intensité du champ magnétique terrestre H et de la quantité de magnétisme m existant au pôle, et l'on a $f = m\text{H}$; d'où, par suite, le moment du couple terrestre est : $2m\text{H}l$. La quantité $2ml$ qui ne dépend que du barreau aimanté est ce que l'on appelle son *moment magnétique*.

1. Soit O le milieu de l'aiguille aimantée NS (fig. 152); pour la ramener à l'horizontalité, on applique en A un poids p qui est défini par la relation suivante, dans laquelle d représente la distance OA :

$$pd = \mu\text{H} \sin i.$$

Si la valeur de l'intensité terrestre devient $\text{H} + \Delta\text{H}$, l'équation n'est plus satisfaite, le fléau s'incline d'un angle α. Si G est le centre de gravité du sys-

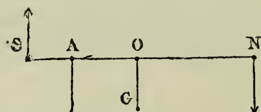


Fig. 152.

tème, dont le poids total est P, et si nous désignons par h la longueur OG, il est facile de voir que l'on a l'équation :

$$\mu(\text{H} + \Delta\text{H}) \sin i \cos \alpha - pd \cos \alpha - \text{P}h \sin \alpha = 0$$

qui, à cause de la relation précédente, se réduit à :

$$\mu\Delta\text{H} \sin i \cos \alpha = \text{P}h \sin \alpha;$$

d'où l'on déduit :

$$\text{tg}\, \alpha = \mu \frac{\Delta\text{H} \sin i}{\text{P}h}$$

et enfin

Comment peut-on comparer les moments magnétiques de deux barreaux aimantés ? On y arrive aisément en les faisant osciller dans les mêmes conditions et évaluant les durées des oscillations.

On peut, par exemple, faire osciller les barreaux dans le plan du méridien magnétique : soient μ et μ' leurs moments, I et I' les moments d'inertie, t et t' la durée de chaque oscillation[1]. On a :

$$\frac{\mu}{\mu'} = \frac{\mathrm{I}t'^2}{\mathrm{I}'t^2}.$$

S'il s'agit d'un même barreau dont on ait changé l'aimantation, comme il arrive dans la détermination de l'inclinaison[2], on a $\mathrm{I} = \mathrm{I}'$ et alors la formule se réduit à :

$$\frac{\mu}{\mu'} = \frac{t'^2}{t^2}.$$

On peut faire osciller les barreaux considérés dans un plan horizontal, comme pour les boussoles de déclinaison : on arrive alors à la même formule[3].

234. Mesure absolue des moments magnétiques. — Si l'on avait un barreau magnétique étalon qui possédât un moment magnétique égal à l'unité, la comparaison avec cet étalon d'un autre barreau

$$\frac{\Delta \mathrm{H}}{\mathrm{H}} = \frac{\mathrm{P}h \operatorname{tg} \alpha}{pd}.$$

On peut déterminer directement la valeur du coefficient constant $\frac{\mathrm{P}h}{pd}$ par la mesure de la durée des oscillations dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique.

1. La formule générale du pendule composé donne immédiatement :

$$t = \pi \sqrt{\frac{\mathrm{I}}{\mu \mathrm{H}}}$$

et

$$t' = \pi \sqrt{\frac{\mathrm{I}'}{\mu' \mathrm{H}}},$$

d'où l'on déduit :

$$\frac{t}{t'} = \sqrt{\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I}'} \cdot \frac{\mu'}{\mu}}$$

ce qui donne la formule ci-dessus.

2. Dans ce cas, la formule (225, note) qui donne tg i ne contient en réalité que le rapport des deux quantités F_1 et F_2, rapport qui est égal à celui de μ à μ' et, par suite, de t'^2 à t^2 que l'on peut introduire directement dans les calculs à la place de F_1 et F_2.

3. Dans ce cas, la force terrestre n'agit que par sa composante horizontale : si donc on appelle i l'inclinaison au point considéré, il vient :

$$t = \pi \sqrt{\frac{\mathrm{I}}{\mu \mathrm{H} \cos i}}$$

quelconque ferait connaître la mesure du moment magnétique de ce dernier, car la mesure d'une quantité est le résultat de la comparaison de cette quantité avec l'unité correspondante.

Connaissant la valeur absolue du moment d'un barreau, si l'on peut déterminer la distance qui sépare les deux pôles, on aura par une simple division la mesure absolue du pôle magnétique considéré.

Il est clair que, au lieu de posséder un étalon ayant un moment magnétique égal à 1, il suffirait de prendre un étalon ayant un pôle magnétique égal à l'unité, à la condition de connaître la distance qui sépare les deux pôles. Le nombre qui mesure cette distance mesurerait aussi le moment.

En réalité il n'existe pas d'étalon représentant l'unité de pôle magnétique, ou l'unité de moment magnétique. L'étude des oscillations du barreau peut conduire à la détermination absolue du moment magnétique, si l'on connaît les éléments du magnétisme terrestre au point considéré.

Les formules rappelées ci-dessus :

$$t = \pi \sqrt{\frac{I}{\mu H}}$$

et

$$t' = \pi \sqrt{\frac{I}{\mu H \cos i}},$$

qui sont applicables respectivement à la boussole d'inclinaison et à la boussole de déclinaison, permettraient de calculer μ si l'on connaissait I et H pour chacune d'elles et en outre i pour la seconde.

La détermination de I se fait, comme nous l'avons indiqué ci-dessus (230), en ajoutant une masse dont le moment d'inertie soit bien déterminé et qui n'étant pas magnétique n'influe point sur les forces en jeu ; on peut employer avec avantage un anneau de cuivre dont le centre est sur l'axe de rotation et dont le moment peut facilement se déterminer par le calcul[1].

et

$$t' = \pi \sqrt{\frac{I'}{\mu' H \cos i}}.$$

En prenant le rapport, les quantités H et cos i disparaissent.

1. On appelle *moment d'inertie* d'un point par rapport à un axe, le produit mr^2 de sa masse par le carré de sa distance à l'axe : le moment d'inertie d'un corps est la somme Σmr^2 des produits analogues correspondant à tous ses points.

Si les éléments du magnétisme H et i sont déterminés, la valeur de μ est immédiatement connue par l'une des équations

$$\mu = \frac{t^2 H}{\pi^2 I}$$

ou

$$\mu = \frac{t'^2 H \cos i}{\pi^2 i}.$$

Si H et i ne sont pas connus, il faut opérer comme nous l'avons dit pour le magnétomètre de Gauss; comme on l'a vu, les opérations déterminent la valeur de deux inconnues dont l'une est précisément μ.

235. Enregistrement photographique des variations magnétiques. — Il est inutile d'insister sur les avantages que présente l'enregistrement continu des variations magnétiques comparé aux observations faites à des heures déterminées : le premier système seul permet de se rendre compte de tous les changements qui se produisent et qui n'ont quelquefois qu'une courte durée.

Comme les forces qui sont mises en jeu dans les phénomènes que nous étudions sont très minimes, on ne saurait songer à un enregistrement mécanique, le moindre frottement arrêtant le mouvement qui avait une tendance à se produire. Aussi le procédé employé est-il toujours l'inscription photographique: un miroir est lié à la pièce dont on veut étudier les changements de direction; un rayon lumineux de direction invariable tombe sur ce miroir et est réfléchi dans une chambre noire sur un papier photographique qui se déroule uniformément. S'il n'y a pas de variation, le faisceau réfléchi reste invariable de position et sa trace sur le papier mobile est une ligne droite; cette ligne est sinueuse, ondulée, au contraire, si le miroir venant à changer de direction le rayon lumineux réfléchi est dévié (la déviation de ce rayon est le double de celle du miroir) : l'étude de cette courbe sinueuse permet de se rendre compte de toutes les variations et même de les évaluer si l'on a eu soin, à l'avance, de faire une graduation par comparaison directe.

Comme on ne peut avoir un seul rayon lumineux, mais seulement un faisceau, on dispose, entre la source de lumière et le miroir réflecteur, une lentille convergente tellement choisie que, après la réflexion sur le miroir qui alors est plan, le foyer se fasse sur le papier sensible. Quelquefois on supprime la lentille et l'on emploie un miroir concave tel que la source de lumière et le papier photographique soient deux foyers conjugués.

236. — Les dispositions que l'on peut adopter sont variables suivant les circonstances que l'on rencontre; nous donnons la description des appareils enregistreurs installés au Collège de France par M. Mascart : cet appareil donne, par l'enregistrement photographique, les variations des trois éléments qui définissent le magnétisme terrestre en un point du globe.

« L'aiguille de déclinaison A (fig. 153) est un petit barreau de 3 centimètres de longueur muni d'un miroir. Un barreau analogue B porté par une suspension bifilaire en fils de soie donne les variations de la composante horizontale. Celles de la composante verticale sont fournies par une aiguille à couteau C oscillant comme un

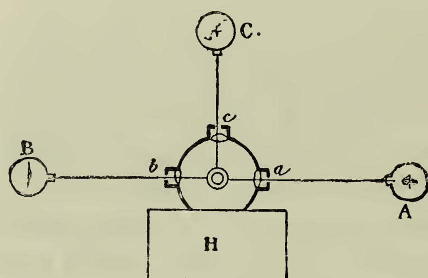


Fig. 153.

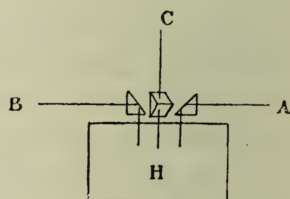


Fig. 154.

fléau de balance. Une seule lampe au gazogène, dont l'éclat est comparable à celui d'une veilleuse, envoie par trois fentes *abc* de la lumière aux trois instruments de variations, et les trois images de retour peuvent, par un système de prismes réflecteurs, tomber sur une même plaque sensible mue par un mouvement d'horlogerie H (fig. 154). Sur chaque appareil de variations est installé un miroir fixe qui donne une image invariable de la fente pour servir de repère. La plaque sensible est du papier au gélatino-bromure placé entre deux lames de verre. Enfin, l'horloge est munie d'un contact électrique qui fait passer toutes les heures un courant momentané dans trois bobines situées respectivement auprès de chaque appareil; l'interruption produite ainsi sur les courbes d'inscription permet de déterminer exactement l'heure de toutes les perturbations. »

CHAPITRE III

MESURES ÉLECTRIQUES

237. — Les mesures électriques peuvent être exécutées à deux points de vue différents : on peut rechercher la valeur absolue des grandeurs électriques, c'est-à-dire la valeur appréciée à l'aide des unités absolues (17) ; ou, simplement, on peut se proposer de comparer entre elles deux grandeurs de même nature : cette comparaison n'implique le choix d'aucune unité déterminée. C'est par cette étude que nous commencerons. Nous nous proposons d'indiquer les principaux appareils et les principaux procédés de mesure pour les divers éléments qu'il est utile de considérer ; ces éléments sont :

La différence de potentiel ou force électromotrice ;

La capacité ;

L'intensité d'un courant, la quantité d'électricité ;

La résistance d'un conducteur.

Pour éviter, dans la mesure du possible, les répétitions en rapprochant les appareils qui servent à effectuer des mesures analogues, nous commencerons par l'étude des appareils et des moyens qui servent à évaluer l'intensité d'un courant ou la quantité d'électricité qui passe dans un conducteur dans un temps donné.

238. Commutateurs. — Dans le multiplicateur et dans tous les appareils qui servent à dénoter l'existence et le sens d'un courant, il y a intérêt à divers égards, et notamment comme moyen de contrôle, à faire passer le même courant dans l'appareil, alternativement dans l'un et l'autre sens ; on se sert, pour arriver à ce résultat, d'appareils désignés sous le nom de *commutateurs* et qui sont usités en outre dans un grand nombre d'autres appareils et d'expériences diverses. Nous décrirons les modèles les plus fréquemment employés.

On peut obtenir un commutateur fort simple à l'aide de 4 coupes remplies de mercure : deux d'entre elles communiquent avec les pôles de la pile, A et B (fig. 155), les deux autres C et D avec les extrémités du fil qui constitue le circuit dans lequel on veut pouvoir changer le sens du courant. Il suffit alors d'établir les communica-

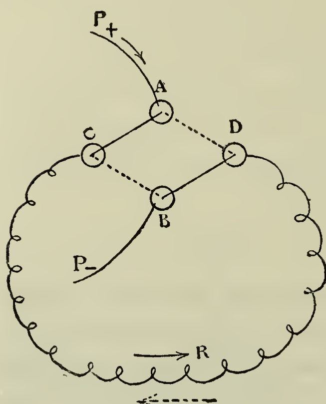


Fig. 155.

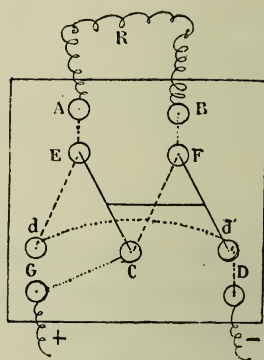


Fig. 156.

tions avec des fils métalliques, par exemple de A en C et de B en D, pour que le courant passe dans le circuit extérieur de C en D. Si, au contraire, les fils métalliques conjonctifs sont placés de A en D et de B en C (comme l'indiquent les lignes pointillées), le courant passe dans le circuit extérieur de D en C.

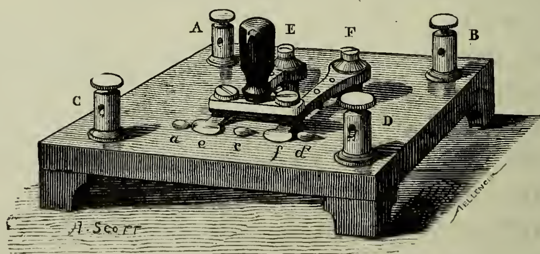


Fig. 157. — Commutateur.

On réalise une disposition de ce genre qui permet rapidement le passage de l'une des positions à l'autre à l'aide du commutateur à bascule d'Ampère, qui est rarement employé aujourd'hui, ou en établissant les communications de la façon suivante : les cavités ou coupes remplies de mercure sont au nombre de cinq disposées, comme

l'indique la figure 156, sur deux rangées. Soient, par exemple, les coupes E et F auxquelles aboutissent les extrémités du circuit extérieur ARB, tandis que par l'intermédiaire de conducteurs convenablement placés la coupe C communique avec l'un des pôles de la pile, le pôle + par exemple, tandis que les deux autres *d* et *d'* sont reliés par D au pôle —. On a, d'autre part, un système de deux tiges métalliques pouvant tourner respectivement autour des points E et F et reliées entre elles par une tige isolante qui est articulée à ses extrémités. Dans la position représentée en lignes pleines sur la figure, le courant va de A en B dans le circuit extérieur; mais en déplaçant les pièces mobiles, on peut les amener à occuper les

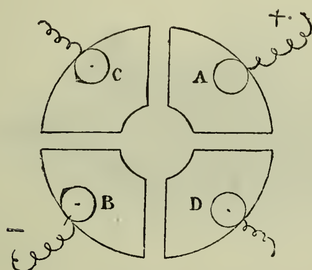


Fig. 158.

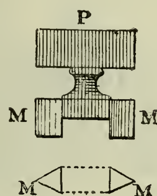


Fig. 159.

positions indiquées en lignes pointillées, de E en *d* et de F en C, et alors le courant va de B en A.

Des dispositions entièrement analogues peuvent être obtenues sans l'emploi du mercure, les communications s'établissant alors par le contact entre des pièces métalliques. C'est ainsi qu'agit le commutateur représenté par la figure 157 où les dispositions sont en tout semblables.

On obtient les mêmes résultats de diverses manières différentes; l'une des plus simples est la suivante : le commutateur de M. Bourseul est formé de quatre pièces métalliques A, B, C, D (fig. 158) séparées par des rainures : les pièces A et B sont reliées aux pôles de la pile, tandis que en C et D sont les extrémités du circuit extérieur. D'autre part, on a (fig. 159) une clef en ébonite, substance isolante, P, présentant à ses deux côtés, à la partie inférieure, des coins métalliques M, M' n'ayant entre eux aucune relation. En plaçant cette clef en diagonale, on établit la communication métallique entre les deux pièces voisines correspondantes, par exemple entre A, C

et entre B, D; ou bien entre A, B et C, D, ce qui reproduit exactement la première disposition.

La disposition de la figure reproduit évidemment, à la différence de la nature des contacts près, celle de la figure 157; il n'y a pas lieu d'insister.

239. — Deux autres commutateurs se rencontrent encore fréquemment : celui de Ruhmkorff et celui de Bertin.

Le commutateur de Ruhmkorff (fig. 160 et 161) est constitué par un cylindre isolant, en ivoire ou en ébonite : l'axe autour duquel il tourne est constitué matériellement par deux pièces métalliques qui pénètrent dans la substance isolante, mais sans se rencontrer; ces

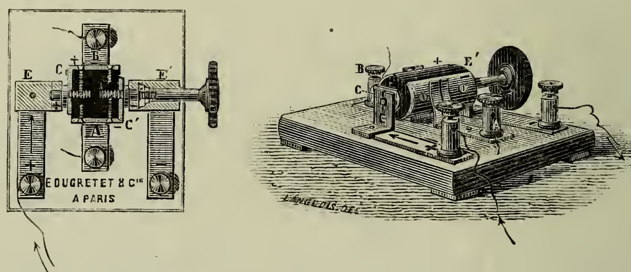


Fig. 160 et 161. — Commutateur Ruhmkorff. (*Ducretet.*)

deux pièces sont portées par deux coussinets métalliques reliés à des bornes où l'on fait aboutir les pôles de la pile, par exemple.

Sur sa surface sont fixées deux pièces métalliques occupant chacune moins de la moitié de la périphérie : à l'aide de vis pénétrant normalement à la surface, chacune de ces pièces est reliée à l'une des portions de l'axe métallique. Enfin, deux frottoirs à ressort sont placés latéralement et forment le point de départ et le point d'arrivée du circuit extérieur.

Lorsque ces frottoirs sont en contact avec la partie isolante du commutateur, le courant ne peut passer; mais si, par une rotation de 1/4 de tour, les frottoirs sont mis en contact avec les pièces métalliques, le courant passe et, comme il est facile de s'en rendre compte, le sens du courant sera différent suivant que la rotation aura été effectuée dans l'un ou l'autre sens.

Le commutateur de Bertin (fig. 162) montre plus nettement que les appareils précédents le sens que possède le courant dans le circuit extérieur. Sur un disque circulaire en bois ou en ébonite

sont fixées deux bandes de cuivre ; l'une *o* est disposée radialement et, au centre, est en communication avec un axe de rotation métallique qui est relié à une borne P où l'on fait aboutir le pôle + de la pile. La seconde bande *ei* est recourbée en forme de fer à cheval : sur la partie convexe, au sommet, se trouve un frottoir à ressort qui est relié au pôle — de la pile par la borne N. Enfin, de l'autre côté du commutateur se trouvent deux autres frottoirs à ressort *r*, *r'* dont l'intervalle est égal à la moitié de l'ouverture du fer à cheval : ces ressorts forment les extrémités du circuit extérieur. En tournant le disque, dont le mouvement est d'ailleurs limité par des taquets, on met en prise la bande radiale avec l'un des ressorts, tandis que l'autre ressort touche l'une des branches du fer à cheval :

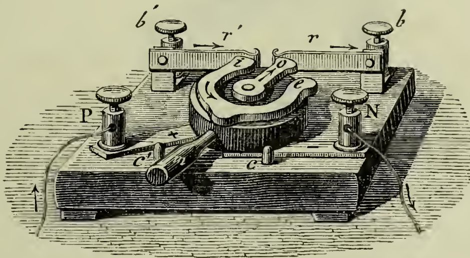


Fig. 162. — Commutateur de Bertin. (*Ducretet.*)

il est clair que le déplacement du commutateur change le sens du courant qui, à chaque position, est indiqué par une flèche tracée sur la bande radiale.

D'autres modèles encore peuvent être employés ; nous ne les décrirons pas, et nous nous bornerons à signaler, sans insister, le modèle que nous avons indiqué précédemment (137).

240. Galvanomètres. Multiplicateurs. — Nous avons indiqué (104) sur quel principe repose le galvanomètre ; nous pouvons maintenant décrire les appareils de formes variées que l'on peut faire rentrer dans la même catégorie.

Le multiplicateur de Schweigger (fig. 163) est un appareil primitif, grossier qui, cependant, peut servir dans quelques cas. Il consiste essentiellement en un cadre de bois sur lequel est enroulé un certain nombre de fois un fil de cuivre isolé dont les extrémités sont fixées à deux bornes auxquelles on vient faire aboutir le circuit qui est traversé par le courant dont il s'agit de reconnaître l'existence. A l'intérieur de ce cadre, une aiguille aimantée est placée sur un pivot autour duquel elle peut tourner dans un plan horizontal.

Lorsque l'on veut se servir de cet appareil, on le place horizontalement et dans une direction telle que lorsque le circuit n'est pas fermé, la direction générale du cadre soit celle de l'aiguille aimantée. Lorsque l'on vient à fermer le circuit, s'il est traversé par un courant, l'aiguille est déviée : le sens dans lequel la déviation se produit permet de reconnaître, d'après la règle d'Ampère (104), le sens du courant même. Quand le courant cesse de passer, l'aiguille revient à sa position primitive.

Cet appareil ne permet de faire aucune mesure ; il n'est que très peu sensible ; on le rencontre cependant adjoint à un certain

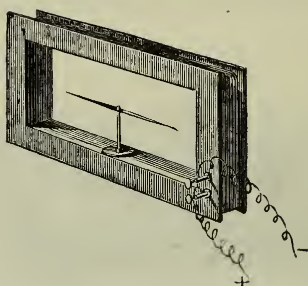


Fig. 163.

nombre d'appareils où il sert uniquement à contrôler si le courant passe et le sens qu'il possède : c'est ainsi qu'on le trouve dans les anciens modèles de la table d'Ampère, dans un certain nombre d'appareils médicaux (piles à courant constant), dans les postes télégraphiques, etc.

241. Influence du nombre des tours dans le multiplicateur. — Le multiplicateur, tel que nous l'avons décrit, est un appareil peu sensible, c'est-à-dire que la déviation varie peu pour une variation assez notable du courant et que, plus spécialement, la déviation est faible même pour un courant énergique.

L'aiguille aimantée est soumise à deux actions opposées, celle de la terre qui tend à la ramener dans le plan du méridien magnétique, et celle du courant qui tend à la mettre en croix avec la direction des fils sur le cadre, direction qui coïncide avec celle du méridien magnétique : l'aiguille s'arrête lorsque les deux forces appliquées à chaque pôle et qui varient l'une et l'autre avec la position de l'aiguille se font équilibre sur ce corps astreint à tourner sur son pivot. On reconnaît aisément que la déviation, toutes choses

égales d'ailleurs, sera d'autant plus grande que l'action de la terre sera moindre et que celle du courant sera plus forte. Il résulte de là que l'on peut employer deux procédés pour augmenter la sensibilité de l'appareil ; l'un, en faisant croître l'action du courant, l'autre, en diminuant la force qui résulte du magnétisme de l'aiguille.

Pour un courant d'intensité donnée, l'action sur l'aiguille sera d'autant plus vive que le fil fera un plus grand nombre de tours sur le cadre : il n'y a pas proportionnalité cependant, et les spires que l'on ajoute étant de plus en plus écartées de l'aiguille ont de moins en moins d'effet, si bien qu'à partir d'une certaine épaisseur les nouveaux fils que l'on pourrait ajouter ne produiraient plus qu'un effet insignifiant.

Mais la question ne se présente pas d'ailleurs d'une manière aussi simple, en général : l'augmentation du nombre des spires ne peut se faire, en effet, sans changer la valeur de l'intensité du courant; les nouvelles spires allongent le circuit, augmentent, par suite, sa résistance, ce qui diminue l'intensité du courant. L'effet de chaque spire diminue en conséquence, au fur et à mesure que leur nombre croît : l'action sur l'aiguille, qui est la résultante des forces émanées des diverses spires, correspond alors à un plus grand nombre de composantes, mais chacune d'elles a une valeur moindre. On ne peut donc prévoir à l'avance quel sera le résultat d'une augmentation du nombre des tours du fil conducteur sur le cadre et, dans chaque cas particulier, il faut déterminer les meilleures conditions par une discussion spéciale : les résultats sont différents suivant les conditions que l'on s'impose.

Une discussion sommaire montre que si la résistance du circuit en dehors du galvanomètre est très grande par rapport à la résistance de chaque spire, il y a intérêt à augmenter le nombre des spires : cette augmentation est, au contraire, sans utilité si la résistance extérieure a une très petite valeur [1].

Cette règle, bien qu'approximative, fournit d'utiles indications et montre que si la source d'électricité est une pile hydroélectrique

1. Appelons E la force électromotrice qui agit dans le circuit, R la résistance totale du circuit en dehors du galvanomètre et r la résistance de chacun des tours (que nous supposons avoir la même longueur, ce qui n'est pas rigoureux). Si n est le nombre des tours et I l'intensité du courant, on a :

$$I = \frac{E}{R + nr}.$$

de grande résistance, si le circuit extérieur comprend des tissus animaux, etc., le galvanomètre devra comprendre le plus grand nombre de tours possible. Comme la résistance de chaque tour est petite par rapport à la résistance extérieure, il y a intérêt à employer des fils fins qui, pour un même nombre de spires, diminuent la distance à l'aiguille, ce qui augmente l'influence de chaque spire.

Dans le cas où la résistance extérieure est très faible, il n'y a aucun intérêt à augmenter le nombre des spires; dès lors il est bon de n'en conserver que très peu, en donnant au fil un assez fort diamètre. C'est le cas qui se présente, par exemple, lorsque la source

D'autre part, la force qui agit sur un pôle de l'aiguille aimantée est proportionnelle à l'intensité du courant : si l'on admet, ce qui n'est pas rigoureux, que tous les tours de spire ont la même action, l'action totale est proportionnelle au nombre des tours et peut se représenter par une expression de la forme

$$F = KnI$$

où K est une constante. On peut écrire cette valeur de F :

$$F = \frac{nKE}{R + nr}$$

et sa valeur dépend de la fraction $\frac{n}{R + nr}$ que l'on peut mettre sous diverses formes. On a ainsi :

$$F = \frac{nKE}{R\left(1 + \frac{nr}{R}\right)}$$

ou

$$F = \frac{nKE}{r\left(\frac{R}{r} + n\right)}.$$

Si R est assez grand pour que l'on puisse pratiquement négliger la fraction $\frac{nr}{R}$, on voit qu'il vient approximativement

$$F = \frac{nKE}{R}$$

valeur qui croît avec n et qui est indépendante de r.

Si, au contraire, la résistance r est assez supérieure à R pour que l'on puisse négliger l'expression $\frac{R}{r}$, il vient :

$$F = \frac{KE}{r}$$

valeur indépendante de n et qui croît en raison inverse de r.

Bien que ces résultats ne soient qu'approximatifs, ils fournissent une indication générale sur les conditions dont on doit chercher à se rapprocher.

d'électricité est une pile thermo-électrique qui, formée entièrement de métaux, a une très faible résistance.

242. De l'astaticité. — On peut, pour augmenter la déviation de l'aiguille, diminuer l'influence du magnétisme terrestre. Mais il ne suffirait pas pour cela d'employer une aiguille faiblement aimantée : la déviation est, en effet, indépendante de l'aimantation de l'aiguille, car l'action de la terre ainsi que celle du courant étant proportionnelles à l'aimantation de l'aiguille, le rapport de ces deux actions, rapport duquel dépend seulement la position de l'aiguille, est indépendant de cette aimantation.

Pour obtenir une augmentation d'effet, il faut évidemment diminuer l'influence terrestre, sans modifier en rien l'action du

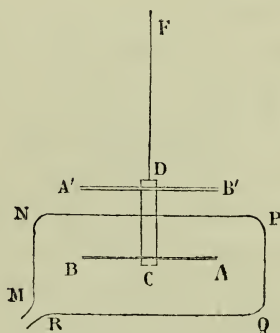


Fig. 164.

courant sur l'aimant. On peut atteindre ce résultat par deux méthodes différentes.

La première consiste à placer dans le voisinage de l'aiguille aimantée un aimant dont la forme, l'aimantation et la position soient tellement choisies que son action soit opposée à celle de la terre ; l'aiguille ne sera soumise en fait qu'à la différence de ces deux actions, différence que l'on peut rendre aussi petite que l'on veut et dont on pourrait même changer le sens s'il paraissait nécessaire, de telle sorte que la direction de l'aiguille soit déterminée par le sens du barreau et non plus par l'action de la terre.

Une autre solution consiste dans l'emploi d'un système *astatique*, qui consiste en deux aiguilles aimantées que l'on place parallèlement de manière que les pôles de noms opposés soient en regard (fig. 164) et qui sont reliées l'une à l'autre par une tige rigide. Un pareil système librement suspendu est soumis à l'action de deux

couples contraires et l'action est déterminée par le couple résultant qui est la différence entre les deux couples composants. Cette différence, et par suite l'action terrestre, peut être diminuée autant qu'on le veut : elle peut même être réduite à 0 si les deux aiguilles ont des moments magnétiques rigoureusement égaux, et dans ce cas le système est en état d'équilibre indifférent dans toutes les positions, il est *astatique* à proprement parler.

Si ce système était placé à l'intérieur du cadre galvanométrique, les diverses spires agiraient également sur les deux aiguilles, mais en sens contraire, puisque les aiguilles sont placées en opposition; l'action du circuit serait donc nulle sur le système qui serait également *astatique* par rapport au courant, et le galvanomètre ne pourrait point fonctionner.

Il n'en est plus de même si le système occupe une position dissymétrique par rapport au cadre, l'une des aiguilles étant seule à l'intérieur, par exemple, et l'autre à l'extérieur; ou bien si le fil constitue un circuit double, au centre de chacune des boucles duquel se trouve une des aiguilles (fig. 165).

Si l'on a un simple circuit, on reconnaît d'après la règle d'Ampère que, comme nous l'avons déjà dit (104), toutes les actions exercées sur l'aiguille intérieure sont concourantes. Sur l'aiguille extérieure, l'action du seul côté compris entre les deux aiguilles agit dans le même sens, tandis que les trois autres produisent un effet inverse. Mais l'action du fil intermédiaire est la plus énergique à cause de la moindre distance à laquelle il se trouve de l'aiguille, de telle sorte que l'effet final du courant est à peu près le même sur le système astatique qu'il serait sur une aiguille seule. On bénéficie donc, en tous cas, de la diminution de l'influence terrestre, diminution qui, nous l'avons dit, peut être aussi grande que l'on veut.

243. — Il importe de remarquer qu'il n'y a point avantage à rechercher l'identité absolue des deux aiguilles, identité qu'il serait d'ailleurs impossible d'obtenir et surtout de maintenir. L'appareil présenterait tous les inconvénients des instruments à équilibre indifférent : les aiguilles seraient déviées *en croix* avec le circuit quelque faible que fût l'intensité du courant, ce qui ne permettrait aucune comparaison, aucune mesure d'intensité; d'autre part, l'aiguille déviée ne tendrait point à revenir à sa position primitive quand le courant cesserait de passer, puisqu'elle ne serait soumise à aucune force (abstraction faite de la torsion du fil de suspension qui est toujours extrêmement faible).

Lorsqu'il y a deux circuits (fig. 165) formés par un même fil qui est

enroulé en 8, et qu'une aiguille est placée au centre de chacune des boucles, les actions de chaque boucle sur l'aiguille correspondante sont concordantes; mais chaque boucle agit inversement sur l'aiguille située dans l'autre, au moins pour la partie qui n'est pas commune; mais, comme précédemment, ces effets inverses ont peu d'importance à cause de la distance assez grande qui sépare les parties entre lesquelles ont lieu ces actions discordantes.

Ajoutons enfin qu'il y a des appareils que l'on doit absolument rapprocher des galvanomètres et dans lesquels la force directrice qui maintient l'aiguille à l'état d'équilibre et qui tend à l'y ramener quand elle en a été écartée n'est pas la force magnétique terrestre. Cette force peut être celle qui provient du voisinage d'un aimant assez puissant, dans le champ magnétique duquel se mouvra

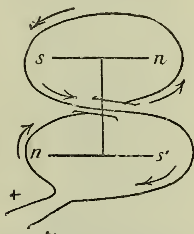


Fig. 165.

l'aiguille soumise à l'action du courant. Ce peut être aussi, par exemple, l'action de la pesanteur.

Nous aurons à décrire des appareils basés sur ces divers principes.

Enfin, nous indiquerons également des appareils destinés à mesurer l'intensité des courants et qui sont basés sur les actions des courants, non sur des aimants, mais sur des circuits traversés également par un courant. A cette classe d'appareils se rattachent les électrodynamomètres, les balances électriques, etc.

244. Description d'un galvanomètre de précision. — Un galvanomètre de précision présente, d'une manière générale, les éléments suivants : un cadre ou bobine entourée de fils conducteurs, un système astatique librement suspendu, une disposition propre à évaluer les déplacements de l'aiguille.

Le cadre est de forme rectangulaire (fig. 166), et est fait de bois ou d'ivoire : afin d'augmenter la grandeur des actions, il convient de diminuer autant que possible la distance qui sépare l'aiguille des

spires conductrices et par conséquent de réduire au minimum la cavité centrale dans laquelle se meut l'aiguille.

Le fil est un fil de cuivre recouvert de soie pour isoler les diverses spires les unes des autres ; il convient, pour les appareils de précision, d'employer de la soie blanche, car il a été reconnu que la soie verte dont on fait souvent usage contient des traces de fer dont l'influence n'est pas toujours négligeable. Suivant les usages auxquels le galvanomètre est destiné, le fil métallique est plus ou moins fin et fait un plus ou moins grand nombre de tours. Dans le cas où l'appareil doit servir comme galvanomètre différentiel, il doit y avoir deux fils distincts enroulés simultanément et, pour plus d'exactitude, il est bon qu'ils forment d'abord une

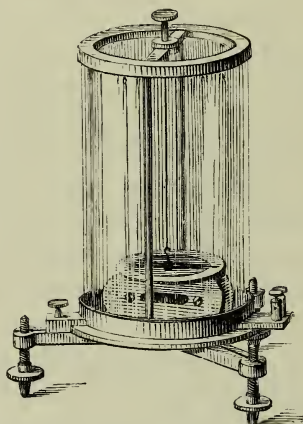


Fig. 166. — Galvanomètre.

torsade que l'on enroule ensuite sur le cadre. Les extrémités du fil ou des fils viennent aboutir à des bornes fixées sur une plate-forme sur laquelle repose le cadre. Ces bornes présentent chacune deux trous munis de vis de pression : l'un des deux sert à recevoir les fils qui correspondent au circuit extérieur ; les autres sont utilisés pour établir entre les bornes des communications directes à l'aide de fils métalliques servant, comme nous le dirons ci-après, soit à réunir les deux fils en série ou en quantité, soit à les mettre en opposition, soit encore à établir un *shunt*, c'est-à-dire à mettre le galvanomètre en dérivation.

Les aiguilles sont en général fort légères et réunies l'une à l'autre par une tige d'un poids très faible, en aluminium, par exemple, qui passe à travers la paroi supérieure du cadre et dans un espace libre

réservé entre des spires du fil conducteur, de telle sorte que l'une des aiguilles soit dans l'intérieur du cadre et l'autre au-dessus.

Cette dernière aiguille se meut parallèlement à une plaque horizontale fixée au-dessus du cadre et portant une division en 360 degrés devant lesquels passe l'une des pointes de l'aiguille ou un index léger qui s'y trouve fixé. Le cercle gradué est généralement constitué par un disque assez épais en cuivre rouge qui a l'avantage, comme nous l'avons indiqué, de diminuer assez rapidement l'amplitude des oscillations de l'aiguille aimantée.

Quelquefois, au lieu d'une aiguille, on emploie, tant à l'intérieur du cadre qu'à l'extérieur, des séries de petites aiguilles aimantées placées parallèlement et montées dans un cadre rigide en aluminium S (fig. 167). Ce cadre peut alors porter un index qui se meut sur un arc gradué placé latéralement.

Lorsque les déviations à observer sont faibles, au lieu de les lire directement sur le cercle gradué, on peut disposer sur une tige rigide placée au-dessus de l'aiguille supérieure un petit miroir M qui sert comme nous l'avons indiqué précédemment (222).

Le système des aiguilles est supporté par un fil sans torsion qui, d'autre part, est fixé à un crochet porté par une potence qui repose sur le pied de l'appareil. Le crochet peut être élevé ou abaissé par l'action d'une vis R : lorsque le galvanomètre ne doit pas servir, on descend le crochet de manière que l'aiguille supérieure repose sur le disque gradué. On relève la vis de manière à donner toute mobilité au système des aiguilles, au moment de faire usage de l'appareil.

Quelquefois le fil est fixé par ses deux extrémités au crochet supérieur et forme une anse F à laquelle est suspendu le système des aiguilles : l'action produite participe alors du système bifilaire et tend à ramener l'aiguille plus promptement que s'il n'y avait qu'une simple torsion.

Ajoutons que l'appareil repose sur un trépied muni de vis calantes, de manière à ramener le cadre à l'horizontalité, ce dont on est assuré en ce que la tige qui réunit les deux aiguilles doit se trouver exactement au centre de l'ouverture circulaire pratiquée dans le cercle gradué.

Enfin, le cadre n'est pas fixé à demeure sur ce trépied et il peut tourner autour de son axe vertical ; souvent le mouvement est obtenu à l'aide d'une crémaillère circulaire avec laquelle engrène un pignon denté mû à l'aide d'un bouton. On peut alors orienter le cadre dans le plan du méridien magnétique et le fixer dans cette position en serrant une vis de pression A.

Dans certains cas, il peut être utile de donner au cadre une direction autre que celle du méridien magnétique : on peut y arriver en plaçant dans le voisinage du galvanomètre, au-dessous, le plus souvent, un barreau aimanté rectiligne dont l'action est plus énergique que celle de la terre et fixe la position des aiguilles ; si ce barreau est un peu éloigné de celles-ci, l'astaticité n'est pas détruite.

245. Galvanomètre différentiel. — L'emploi des deux fils que nous avons signalés dans le galvanomètre permet diverses combinaisons qui ont leur utilité dans plusieurs cas.

Ces deux fils peuvent être employés différentiellement : c'est-à-

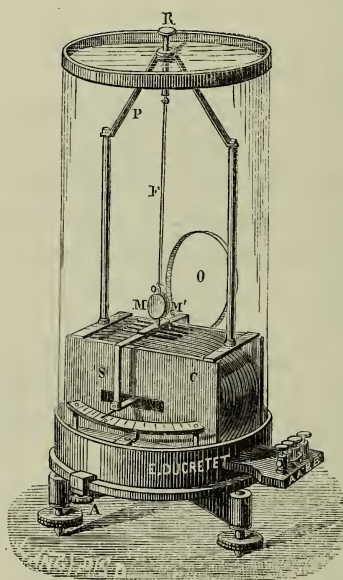


Fig. 167. — Galvanomètre différentiel. (*Ducretet.*)

dire que l'on peut comparer deux courants en les faisant circuler un dans chaque fil, mais en sens contraires. Si les fils sont bien identiques et les courants égaux, leurs actions se détruisent et les aiguilles restent immobiles. Réciproquement, l'immobilité de l'aiguille indiquera l'égalité des deux courants, si l'on s'est assuré de l'identité des deux circuits. On peut d'ailleurs faire cette vérification facilement : si, par exemple, un courant I passant dans le fil A a été équilibré par un courant I′ passant dans le fil B, on fait une seconde opération inverse (méthode du retournement), c'est-à-dire que l'on fait passer le courant I′ dans le fil A et le courant I dans le fil

B. Si l'équilibre subsiste, on peut être assuré que les courants sont égaux et que les fils agissent de la même façon sur les aiguilles.

On peut d'ailleurs s'assurer une fois pour toutes de cette identité d'action des fils, par une expérience analogue à celle que nous venons d'indiquer ; il sera alors inutile, lors des autres mesures, de pratiquer le retournement.

Si l'action des deux fils a été vérifiée identique à l'avance et si, par le passage des deux courants comme il a été dit plus haut, l'aiguille se dévie dans un sens ou dans l'autre, c'est que les intensités des deux courants sont inégales, et le sens de la déviation permet de savoir quel est le courant le plus intense.

Le galvanomètre peut ne pas être employé différentiellement, mais de manière à mesurer l'intensité d'un seul courant. On peut alors opérer de diverses façons :

1° Faire passer le courant à travers un seul fil.

2° Faire passer le courant à travers les deux fils réunis en tension, c'est-à-dire mis à la suite de manière à constituer un circuit unique ayant une longueur double de celle que présente un seul fil. Il faut bien entendu que le courant traverse les deux fils dans le même sens ; généralement les bornes portent des lettres : A et A′ correspondent à l'un des fils, B et B′ à l'autre. Pour réunir les fils en série, on met l'extrémité de l'un des fils du circuit extérieur à la borne A tandis que l'autre est fixé à la borne B′ ; puis à l'aide d'un morceau de fil métallique, on réunit directement les bornes A′ et B.

3° Les deux fils peuvent être réunis en quantité, c'est-à-dire que le courant les traverse à la fois dans le même sens : pour arriver à ce résultat, on réunit par des fils métalliques les bornes A et B d'une part, et les bornes A′ et B′ de l'autre, puis on fait aboutir les extrémités du circuit extérieur, l'une en A ou B, l'autre en A′ ou B′.

Si n est le nombre des spires, r la résistance moyenne de chacune d'elles, on voit que ces dispositions correspondent :

1° A utiliser n spires de résistance r, soit une résistance totale nr.

2° A utiliser $2n$ spires dont la résistance totale sera $2nr$.

3° A utiliser n spires constituées chacune par les deux fils supposés réunis et dont l'ensemble a une résistance moitié moindre que chacun d'eux : il y aura donc n spires et la résistance totale sera $\frac{nr}{2}$.

Dans chaque cas particulier, on devra discuter ou essayer directement quelle est la combinaison la plus avantageuse.

Les galvanomètres présentent quelquefois quatre fils distincts

enroulés séparément, qui donnent la possibilité d'adopter des combinaisons variées analogues à celles que nous venons d'indiquer pour le cas de deux fils seulement.

Les fils employés dans les galvanomètres ont des diamètres variables suivant l'usage auquel l'appareil est destiné : tantôt il est de 0,7 millimètre, par exemple, et alors la longueur totale du fil ne dépasse pas 3 à 4 mètres; tantôt au contraire le fil est fin, 0,16 millimètre de diamètre, et alors il faut un très grand nombre de tours sur le cadre, 10 000, 20 000 et même 40 000. Nous avons déjà indiqué (241) quels sont les cas dans lesquels il convient de choisir l'un ou l'autre modèle.

246. Magnétomètre de Weber. — Dans le magnétomètre de Weber, les déviations sont toujours fort petites, ce qui permet d'admettre qu'elles sont proportionnelles à l'intensité du courant; afin de pouvoir les apprécier, on emploie un miroir mobile avec l'aiguille.

La bobine (fig. 168) est constituée par deux ou trois fils égaux généralement, enroulés sur une bobine à section elliptique et formée par un cylindre creux de cuivre rouge qui, comme nous l'avons dit, a pour effet d'amortir très rapidement les oscillations. Le barreau aimanté est un barreau d'acier cylindrique de 1 centimètre de diamètre environ : il est porté par un étrier suspendu à un cadre rectangulaire au milieu duquel passe la partie supérieure de la bobine; ce cadre soutient un petit miroir vertical placé au dessus de celle-ci et qui participe à tous les mouvements du barreau. Il est soutenu enfin par un fil de soie qui, à son extrémité opposée, va s'enrouler sur un petit treuil qui repose à la partie supérieure d'un long tube de verre s'élevant verticalement au-dessus de la bobine. Tout l'appareil est porté sur un trépied à vis calantes dont un niveau à bulle d'air permet de vérifier l'horizontalité. La bobine peut d'ailleurs tourner avec le tube et le barreau autour d'un axe vertical, de manière à amener le barreau dans la direction du méridien magnétique.

Le miroir sert, comme nous l'avons déjà expliqué, à mesurer les petites déviations, grâce à l'emploi d'un viseur (règle divisée et lunette).

247. Galvanomètre a indications proportionnelles. — Dans le galvanomètre, ou le multiplicateur, il n'y a pas de relation simple entre la déviation observée et l'intensité du courant qui traverse le fil; comme nous l'avons sommairement indiqué (105), on peut par comparaison arriver à former un tableau numérique ou une courbe permettant d'avoir l'intensité du courant lorsque l'on aura déterminé la déviation.

Si les déviations sont très petites et ne dépassent pas 4 à 5°, on pourra admettre la proportionnalité, au moins approximativement.

On a cherché à réaliser cette proportionnalité, ou du moins à s'en approcher davantage, par diverses dispositions se rapportant au galvanomètre ordinaire : nous en indiquerons deux seulement.

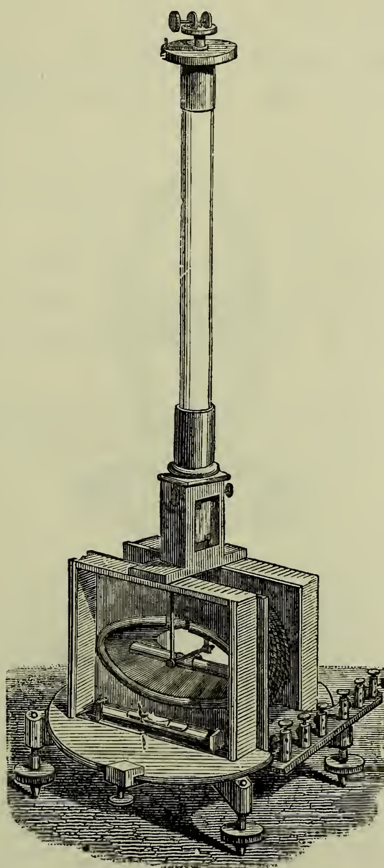


Fig. 168. — Magnétomètre de Weber. (*Ducretet.*)

M. Gostynski, reprenant une idée de Peltier, a employé deux systèmes astatiques de même sens, croisés à 45° et réunis invariablement l'un à l'autre. Lorsque le galvanomètre est au zéro, l'un des systèmes doit être parallèle au cadre du galvanomètre et le sens du courant dans le circuit doit avoir pour effet de rapprocher de ce cadre le second système astatique qui, par suite, a une inten-

sité moindre que le premier. Dans ces conditions, la proportionnalité serait vérifiée, paraît-il, même pour de grands angles.

M. Gaiffe a cherché à résoudre la même question d'une manière différente : c'est en donnant au cadre une forme particulière qu'il est arrivé au résultat. Une courbe elliptique lui aurait donné la proportionnalité jusqu'à 35°; il aurait même pu, paraît-il, arriver jusqu'à 75° dans des conditions analogues en employant une autre courbe qu'il n'a pas encore fait connaître.

248. Boussole des tangentes. — L'aiguille d'un galvanomètre est soumise à deux forces (à chaque pôle). L'action de la terre est déter-

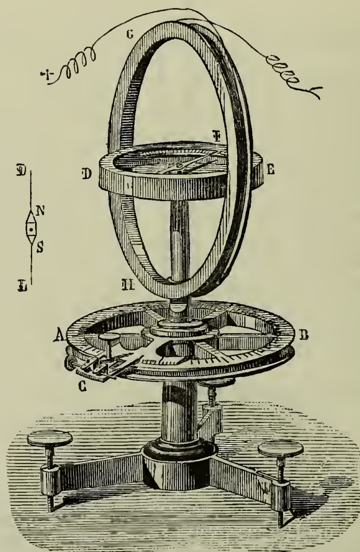


Fig. 169. — Boussole des tangentes. (*Ducretet.*)

minée par une loi simple, elle varie proportionnellement au sinus de l'angle de déviation. Si l'action du cadre galvanométrique était déterminée simplement aussi, on pourrait trouver une relation entre la déviation et l'intensité du courant; mais c'est ce qui n'a pas lieu ordinairement, avec les cadres à peu près rectangulaires et les aiguilles assez longues qu'ils contiennent.

On sait, en effet, que l'action d'un élément de courant sur un pôle est une force proportionnelle à l'intensité du courant, inversement proportionnelle au carré de la distance et dirigée perpendiculairement au plan qui contient le pôle et l'élément de courant (174). On conçoit que, pour un cadre de forme quelconque et un pôle situé

excentriquement, la résultante de toutes les actions élémentaires ne soit pas, comme direction et comme grandeur, en relation simple avec l'intensité du courant.

Il en serait tout autrement si l'on considérait, par exemple, un cadre circulaire de rayon r agissant sur un pôle situé en son centre. Si i est l'intensité du courant, pour un élément ds, la force sera $\frac{mids}{r^2}$, m étant l'intensité du pôle. Cette force sera perpendiculaire au plan du cercle et il en sera de même de toutes les forces émanées des autres éléments, de telle sorte que la résultante sera égale à la somme des forces élémentaires. Elle aura donc pour valeur $\frac{mi \times 2\pi r}{r^2} = \frac{2m\pi}{r}$ pour un tour et $\frac{2mn\pi}{r}$ si le fil fait n tour, c'est-à-dire que pour un même appareil elle sera proportionnelle à l'intensité du courant.

Il en sera *sensiblement* de même si l'aiguille est très petite par rapport au rayon du cercle : la résultante qui agira sur un des pôles s'éloignera très peu d'avoir la valeur et la direction indiquées ci-dessus.

Supposons donc une petite aiguille ns (fig. 170) suspendue au centre d'un cercle d'assez grand rayon et placée dans le méridien

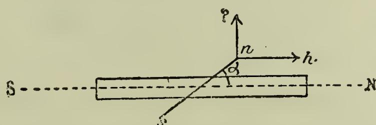


Fig. 170.

magnétique : lorsque le courant ne passera pas, l'aiguille sera dans le plan du cercle ; quand le courant passera, l'aiguille sera déviée d'un certain angle α. L'action de la terre s'exerce parallèlement au méridien magnétique NS, soit φ sa valeur (cette valeur est égale à m H, H étant l'intensité du champ magnétique) ; l'action du courant s'exerce perpendiculairement au plan du cercle, si l'aiguille est assez courte, comme nous l'avons dit, et son intensité peut être représentée par hi $\left(\text{en posant } h = \frac{2mn\pi}{r}\right)$. L'équilibre s'établira lorsque la somme des moments par rapport au centre sera nulle, c'est-à-dire lorsque l'on aura, en appelant l la demi-longueur de l'aiguille :

$$\varphi . l \sin \alpha = hi . l \cos \alpha$$

D'où :

$$i = \frac{\varphi}{h} \operatorname{tg} \alpha .$$

Les quantités φ et h étant constantes pour un même appareil et en un même point du globe, on voit qu'il y a proportionnalité entre les intensités du courant et les tangentes des angles de déviation. On peut donc, avec un appareil ainsi disposé et qui porte, pour cette raison, le nom de *boussole des tangentes*, comparer les intensités de deux courants; car si α et α' sont les déviations correspondant aux intensités i et i', on a :

$$\frac{i}{i'} = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\alpha'}.$$

Il est à remarquer que l'angle qui détermine la position d'équilibre étant donné par une tangente, cette position peut toujours être atteinte puisque la tangente prend toutes les valeurs possibles, de $-\infty$ à $+\infty$.

Si l'on connaissait la valeur de $\frac{\varphi}{h}$, cet appareil permettrait de mesurer l'intensité absolue, et non pas seulement d'effectuer des mesures relatives, des comparaisons.

249. — En réalité, les conditions ne sont pas aussi simples que nous l'avons supposé; car, quelque courte que soit l'aiguille, son pôle ne reste pas confondu avec le centre du cercle; par suite, la résultante n'a ni la valeur, ni la direction que nous avons indiquées.

Après des expériences directes, M. Gaugain reconnut que l'on peut obtenir une proportionnalité presque rigoureuse à la condition de placer l'aiguille de telle sorte que son centre soit en dehors du plan du cercle et à une distance égale au quart du rayon du cercle. Les vérifications étaient faites à l'aide de quatre fils distincts enroulés sur le cercle et dans lesquels on pouvait faire passer isolément des courants égaux, ce qui permettait de faire varier l'action dans le rapport de 1 à 4. M. Bravais (*Ann. de ch. et de ph.* [3], tome XXXVIII) vérifia ce résultat par un calcul déduit des formules d'Ampère.

En disposant le fil isolé sur une portion de surface conique (fig. 171) au sommet de laquelle se trouve le centre de l'aiguille et dont l'angle est défini par la condition que la distance de ce centre au plan de chaque spire est le quart du rayon de cette spire, M. Gaugain put construire une boussole contenant une longueur de fil plus grande que celle qui existe sur les boussoles des tangentes ordinaires et qui, par là même, à égalité d'intensité de courant, donne de plus grandes déviations de l'aiguille.

Dans les boussoles des tangentes, l'aiguille étant généralement de

petite longueur ne permettrait pas de mesurer aisément les angles de déviation : on y adapte un index constitué par un long barreau placé perpendiculairement et qui se meut sur un cercle divisé; ce

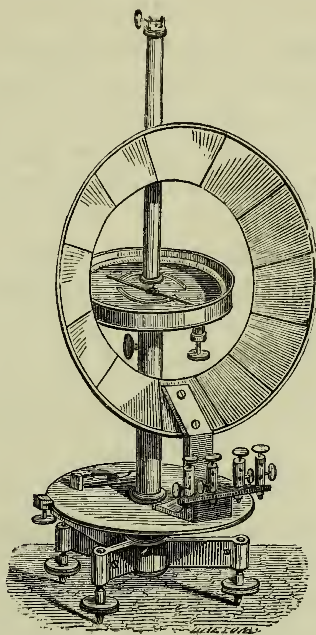


Fig. 171. — Boussole de Gaugain. (*Ducretet.*)

barreau est en aluminium et fort léger, de telle sorte qu'il ne charge que très peu le pivot.

250. Boussole des sinus. — Pouillet donna une autre solution de la mesure de l'intensité des courants, à l'aide de la boussole des

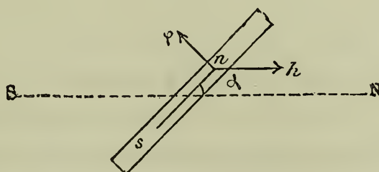


Fig. 172.

sinus. Cette boussole (fig. 172) diffère de la boussole des tangentes, seulement en ce que le cercle sur lequel est enroulé le fil est mobile autour d'un axe vertical et que l'on peut mesurer les angles dont il tourne. Voici comment on se sert de cet appareil.

Le courant ne passant pas, le plan du cercle est amené dans le plan du méridien magnétique NS, plan qui est défini par la direction de l'aiguille aimantée librement suspendue sur un pivot au centre du cercle. On fait alors passer le courant, l'aiguille est déviée dans un certain sens; on rend le cercle libre et on lui communique un mouvement de rotation tel qu'il se rapproche de l'aiguille qui tend à s'écarter davantage. Mais, dans certains cas, elle s'éloigne moins vite que l'on ne rapproche le cercle, de telle sorte que l'on parvient à placer de nouveau l'aiguille *ns* dans le plan du cercle : on lit alors l'angle dont a tourné le cercle, angle qui est celui qu'il fait, comme l'aiguille aimantée, avec le méridien magnétique. Soit α cet angle; un raisonnement analogue à celui que nous avons fait ci-dessus donne immédiatement pour l'équation d'équilibre :

$$\varphi . l \sin \alpha = hi . l$$

D'où :

$$i = \frac{\varphi}{h} \sin \alpha.$$

L'intensité du courant est donc proportionnelle au sinus de l'angle dont a tourné l'appareil.

On voit que, pour une même variation de i, la variation de α donnée par la dernière équation est plus grande que celle qui correspond à l'équation de la boussole des tangentes[1] ; par suite, la boussole des sinus sera plus sensible que la boussole des tangentes.

Il est à remarquer que la position d'équilibre étant donnée par l'équation :

$$\text{Sin } \alpha = \frac{h . i}{\varphi},$$

où l'angle α est déterminé par un sinus, cette position n'existera pas toujours puisqu'il faut que $\frac{hi}{\varphi}$ soit plus petit que 1, ou tout au plus égal à cette valeur. La boussole des sinus ne devra donc pas être utilisée pour les courants intenses : on en sera averti, d'ailleurs, parce que lorsque l'on fera tourner le cercle, l'aiguille fuira sans se laisser rattraper.

L'aiguille se retrouvant dans le plan du cercle, au moment de

1. En effet, puisque pour une même variation de l'angle la tangente varie plus que le sinus, il faut que, inversement, pour une même variation des lignes trigonométriques, l'angle varie plus pour le sinus que pour la tangente.

l'équilibre, les différences qui se manifestent entre la valeur vraie de la force et celle déduite de la théorie primitive sont moindres que pour la boussole des tangentes : aussi peut-on, sans inconvénient sérieux, prendre une aiguille aimantée plus longue que dans cet appareil.

251. Sensibilité des galvanomètres et des boussoles. — L'idée générale de la sensibilité d'un appareil ne présente rien de précis d'une manière absolue et a besoin d'être nettement définie. M. R. Picou a cherché à introduire des indications caractérisant cette idée, pour le cas des appareils de mesures électriques en particulier.

Il importe de remarquer que les galvanomètres et les boussoles ne sont pas employés toujours dans les mêmes conditions. Tantôt ces appareils servent à reconnaître si un courant passe ou non dans un circuit, tantôt ils doivent servir à mesurer la valeur de l'intensité : dans le premier cas ce sont des instruments de *recherche*, dans le second cas seulement ce sont des appareils de *mesure*.

Dans l'un et l'autre cas l'intensité i est liée à l'angle de déviation observé α par une équation telle que :

$$i = f(\alpha, a, b \ldots)$$

dans laquelle a, b sont des constantes qui dépendent des conditions de construction de l'appareil. Lorsque l'intensité varie de di l'angle observé varie de $d\alpha$ et l'on a entre ces deux variations la relation :

$$di = f'(\alpha, a, b \ldots)\, d\alpha.$$

Dans les appareils de recherche, il faut que, à partir d'une position déterminée, pour une valeur donnée α_1 de α, $d\alpha$ soit le plus grand possible, c'est-à-dire que $\frac{d\alpha}{di}$ soit le plus grand possible également. C'est ce rapport qui caractérise la sensibilité s que nous appellerons *sensibilité absolue*.

Il faudra, pour chaque cas déterminé, rendre maxima la valeur de cette expression; si l'appareil est construit et fonctionne dans une situation déterminée, les quantités a, b... sont constantes et α est seule variable; mais, d'une manière plus générale, au contraire, on pourra rechercher la valeur de ces quantités a, b.., pour que la sensibilité soit maxima dans une circonstance donnée.

C'est ainsi que l'équation qui détermine le mode d'action de la

boussole des tangentes contient, dans la valeur de h, le nombre de tours n du fil, le rayon du cercle r et l'intensité m du pôle de l'aiguille puisque l'on a $h = \frac{2mn\pi}{r}$; on a :

$$i = \frac{\varphi}{h} . \operatorname{tg} \alpha . = \frac{Hr}{2\pi n} \operatorname{tg} \alpha.$$

On aura donc :

$$s = \frac{2\pi n}{Hr} \cos^2\alpha.$$

On voit, d'une manière générale, qu'il y a lieu de donner à n la plus grande et à r la plus petite valeur possible ; mais on est arrêté rapidement. Si l'on fait croître n, la résistance de l'appareil augmente et son introduction dans le circuit fait varier notablement l'intensité du courant ; si on fait décroître r trop fortement, on ne peut plus admettre les conditions que nous avons supposées (250) et l'équation n'est plus rigoureuse.

Dans des conditions données et pour une déviation α_1 correspondant à une intensité :

$$i_1 = \frac{Hr}{2\pi n} \operatorname{tg} \alpha_1$$

la sensibilité a la valeur s_1 donnée par :

$$s_1 = \frac{2\pi n}{\varphi r} \cos^2 \alpha_1$$

Mais, d'autre part, pour un appareil donné on peut rechercher dans quelles circonstances sa sensibilité absolue est la plus grande : c'est-à-dire qu'il faut chercher la valeur de α qui rend maxima la valeur de s ; on voit immédiatement que ce résultat est atteint pour $\alpha = 0$, valeur qui correspond à $i = 0$. C'est-à-dire que la sensibilité absolue d'une boussole des tangentes, et sensiblement aussi celle d'un galvanomètre (quoique la question soit moins simple pour cet appareil), est la plus grande possible lorsque ces appareils sont employés à déceler l'existence d'un courant ou à signaler sa non-existence. On sait que c'est là ce qui constitue la méthode de la *réduction au zéro*.

S'il s'agit d'une mesure, à proprement parler, ce qu'il importe de considérer c'est, non la valeur absolue de di, mais le rapport de di

à i; ce sera la *sensibilité relative* S, qui sera d'autant plus grande que $d\alpha$ sera plus considérable pour une valeur donnée de $\frac{di}{i}$; elle sera mesurée par :

$$S = d\alpha : \frac{di}{i}$$

ou bien :

$$S = i : \frac{di}{d\alpha} = \frac{f(\alpha,a,b\ldots)}{f'(\alpha,a,b\ldots)}$$

et c'est cette quantité qui devra être maxima.

Pour la boussole des tangentes, on aura pour cette valeur :

$$S = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\frac{1}{\cos^2\alpha}} = \frac{1}{2}\sin 2\alpha.$$

Cette valeur sera maxima pour $2\alpha = 90$ ou $\alpha = 45°$, ce qui donne $\sin 2\alpha = 1$. Pour obtenir le maximum de sensibilité avec la boussole des tangentes comme mesure d'intensité, il faudra donc s'arranger pour que $\alpha = 45°$, ce à quoi l'on pourra toujours arriver en modifiant le nombre des spires que traverse le courant.

252. Emploi du galvanomètre en dérivation. Shunt. — Il est très important à tous égards de ne pas faire traverser le fil d'un galvanomètre par des courants énergiques; d'abord parce que sous leur influence l'aimantation des aiguilles peut être modifiée, renversée même; puis parce que les fils s'échauffent alors et que les substances isolantes qui les entourent peuvent fondre ou être détériorées. Lorsqu'il ne s'agit que de constater l'existence d'un courant, on peut l'affaiblir en introduisant des résistances dans le circuit en même temps que le galvanomètre de manière à être assuré que l'intensité sera très faible, quitte à diminuer la valeur de la résistance accessoire si l'affaiblissement a été trop considérable. Les boîtes de bobines de résistance se prêtent très bien à cette opération.

Mais l'on ne peut opérer ainsi lorsqu'il s'agit de mesurer l'intensité du courant qui passe dans un circuit donné, puisque ce courant serait modifié par l'emploi des bobines. On pourrait, il est vrai, déduire de l'intensité du courant affaibli celle I du courant primitif, si l'on connaissait la résistance du circuit extérieur et celle du galvanomètre; mais il peut être préférable d'adopter une disposi-

tion qui évite tout calcul[1]. Pour cela on place le galvanomètre en dérivation, on fait usage d'un *shunt*, suivant l'expression consacrée.

Si l'on établit une communication entre les deux bornes d'un galvanomètre à l'aide d'un fil métallique et si l'on intercale ce galvanomètre dans un circuit parcouru par un courant, l'aiguille du galvanomètre sera déviée d'une quantité moindre que si cette communication n'existait pas et dont la valeur dépendra de la relation qui existe entre la résistance du galvanomètre même et celle de cette communication métallique, qui constitue ce que l'on appelle un *shunt*.

Nous avons dit, en effet (121), que lorsqu'un courant avait à passer simultanément dans plusieurs conducteurs ayant les mêmes extrémités, les quantités d'électricité se répartissent dans chacun d'eux proportionnellement à leurs sections réduites, c'est-à-dire, par conséquent, en raison inverse des résistances. Si donc I est l'intensité du courant qui traverse le circuit, i et i_g les intensités des courants qui traversent respectivement le *shunt* et le galvanomètre dont B et r sont les résistances (et dont les sections réduites sont dès lors $\frac{1}{B}$ et $\frac{1}{r}$), on a :

$$\frac{i_s}{\frac{1}{B}} = \frac{i_g}{\frac{1}{r}}$$

ou :

$$\frac{i_s}{r} = \frac{i_g}{B} = \frac{I}{r + B}.$$

On déduit de là :

$$i_g = I \frac{B}{r + B}$$

et l'on voit que l'on peut donner à i_g telle valeur absolue que l'on veut en choisissant convenablement le rapport $\frac{B}{r + B}$.

En général, les shunts (fig. 173) sont fournis par les construc-

1. Soient E la force électromotrice de la source électrique, R la résistance du circuit primitif (y compris la pile ou la machine génératrice du courant), r la résistance du galvanomètre; soient, d'autre part, i l'intensité évaluée après l'introduction du galvanomètre et des bobines de résistance, I l'intensité dans le circuit primitif. On a immédiatement

$$i = \frac{E}{R + r + b}$$

teurs du galvanomètre ; ils sont souvent choisis de manière à avoir l'une des valeurs suivantes :

$$r = 9\ \mathrm{B} \qquad r = 99\ \mathrm{B} \qquad \text{et} \qquad r = 999\ \mathrm{B}$$

On a alors respectivement pour les intensités des courants qui traversent le fil du galvanomètre :

$$i_g = 0{,}1\ \mathrm{I} \qquad i_g = 0{,}01\ \mathrm{I} \qquad \text{et} \qquad i_g = 0{,}001\ \mathrm{I}.$$

On pourrait même, s'il était nécessaire, aller encore plus loin et par conséquent réduire davantage l'intensité du courant qui tra-

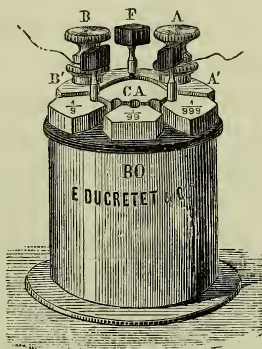


Fig. 173. — Shunt. (*Ducretet.*)

verse le galvanomètre, éviterait toute détérioration des fils de cet appareil.

Dans le cas où les shunts n'existent pas, on peut en établir facilement après avoir déterminé la résistance du galvanomètre (295) et obtenir ainsi telle réduction que l'on veut.

L'emploi d'un shunt garantit évidemment l'appareil contre des détériorations et, lorsque l'on agit sur un courant dont on ne con-

et

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R}}.$$

On déduit de là :

$$\frac{1}{\mathrm{I}} = \frac{1}{i} - \frac{r + \mathrm{B}}{\mathrm{E}}$$

et par suite :

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{E}i}{\mathrm{E} - i(r + \mathrm{B})}.$$

naît pas la valeur, il convient toujours de faire usage du shunt de plus faible résistance; on le remplace successivement par les autres ou même on l'enlève totalement suivant la valeur de la déviation observée.

Il va sans dire que l'emploi du shunt diminue l'approximation sur laquelle le galvanomètre employé donnerait le droit de compter; l'erreur absolue que l'on commet à la lecture reste la même, mais elle se trouve multipliée par le même facteur qui sert à évaluer l'intensité vraie du courant.

Si l'on a un galvanomètre dans un circuit et que l'on y établisse un shunt, cela changera la résistance totale et par suite l'intensité même du courant; pour ramener cette intensité à sa valeur primitive, s'il était nécessaire, il faudrait introduire dans le circuit une résistance convenablement choisie[1].

253. Galvanomètre de Thomson; galvanomètre dead beat. — Dans le galvanomètre de Thomson, qui a été principalement utilisé au début pour le fonctionnement du télégraphe transatlantique, mais qui peut être employé à d'autres usages, le fil (dont le diamètre et la longueur varient suivant les conditions du circuit extérieur) est enroulé sur une petite bobine circulaire (fig. 174) présentant, en son centre, une ouverture circulaire également mais de petit diamètre. Le barreau aimanté est constitué par un petit morceau de ressort de montre dont la longueur ne dépasse pas 5 à 6 millimètres et qui est collé sur la face postérieure d'un miroir de verre mince de mêmes dimensions : le tout est d'un poids très minime, à peine 7 à 8 centigrammes.

Le miroir est suspendu à l'aide d'un fil de cocon fixé par son extrémité supérieure quelque peu au-dessus de la bobine, au centre de laquelle se trouvent le miroir et l'aimant. Celui-ci subit une action énergique du courant, à cause de la faible distance qui le sépare des spires du fil conducteur. La partie centrale de la bobine

1. Soient R la résistance extérieure, r celle du galvanomètre, B celle du shunt et B′ celle de la bobine que l'on introduirait extérieurement; il faut pour que la résistance totale ne soit pas changée que l'on ait :

$$R + r = R + B' + \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{B}}$$

d'où l'on déduit :

$$B' = \frac{r^2}{B + r}.$$

est fermée par des lames de verre; l'appareil entier est porté par un trépied T muni de vis calantes. Il est surmonté d'une tige verticale, le long de laquelle peut glisser et tourner un aimant courbe SN qu'une vis de pression permet de fixer à une hauteur quelconque.

En changeant la position de cet aimant, on parvient à diminuer, à annuler même l'action terrestre. Il est donc possible de faire varier la sensibilité de l'appareil, entre certaines limites au moins, en même temps qu'il est inutile de l'orienter dans le méridien

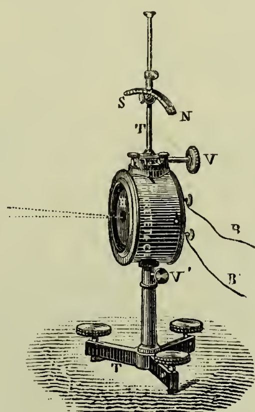


Fig. 174. — Galvanomètre Thomson. (*Ducretet.*)

magnétique, car à l'aide de l'aimant on pourra toujours amener le plan du couple directeur à être parallèle aux plans des spires.

Bien entendu, on ne peut observer ni mesurer directement les déviations de l'aimant, et l'on fait exclusivement usage de la réflexion des rayons lumineux, comme il a déjà été expliqué.

Dans un modèle disposé en vue de l'usage à bord des navires, on retrouve des dispositions analogues, seulement le fil de soie au lieu d'être librement suspendu est fixé à ses deux extrémités et tendu : il passe par le centre de gravité du système formé par l'aimant et le miroir, système qui est dès lors en état d'équilibre indifférent et dont la direction, indépendante de l'action de la pesanteur, est déterminée par la présence de deux aimants convenablement placés dans le voisinage.

254. — Dans d'autres modèles encore, il existe deux aiguilles aimantées réunies par une tige rigide et formant un système astatique. Il y a alors deux bobines placées l'une au-dessus de l'autre, au centre de chacune desquelles se trouve l'un des aimants. Pour que

les actions du courant sur les aimants soient concordantes, il faut que le fil s'enroule en sens contraire sur les deux bobines.

Comme dans l'appareil précédent, un aimant courbé en arc permet de donner aux aiguilles aimantées telle direction que l'on désire. L'une de ces aiguilles porte un miroir et les mesures se font comme il a été dit précédemment.

Afin d'amortir les oscillations et de ramener promptement le système à l'équilibre, on adapte quelquefois un petit disque de mica à celle des aiguilles, l'inférieure généralement, qui ne porte pas le miroir. Quelquefois enfin, au lieu d'un seul morceau d'acier aimanté, on en emploie plusieurs, trois ou quatre, placés parallèlement.

La résistance de l'air, jointe à l'influence du cuivre qui forme la bobine, amène promptement le système à une position d'équilibre; il n'y a plus d'oscillations, à proprement parler, mais seulement de faibles vibrations autour de la position d'équilibre. C'est ce résultat

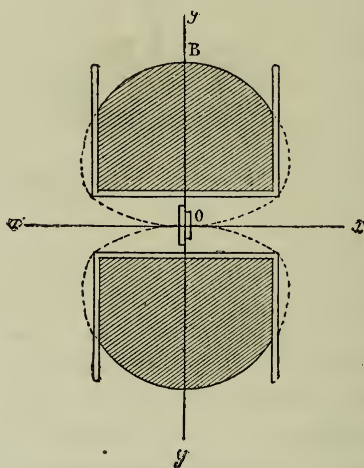


Fig. 175.

qui a fait donner par Sir William Thomson le nom de *dead-beat* (battements amortis) aux galvanomètres présentant ce caractère: on les désigne aussi sous le nom de galvanomètres *apériodiques*.

255. — La disposition des fils autour de la bobine n'est pas indifférente, car les diverses spires sont loin d'avoir la même influence à cause des différences de distance. Pour un fil dont le diamètre et la longueur sont donnés, il y a une forme de la section d'enroulement qui est la meilleure. Sir William Thomson a déterminé cette forme

pour le cas d'un aimant de petites dimensions, tel que celui qu'il emploie dans son galvanomètre à miroir. Dans le cas d'un pôle placé au centre, la courbe qui détermine le maximun d'action est celle représentée sur la figure en lignes pointillées (fig. 175); mais comme on ne peut la réaliser, on prend une disposition pratique qui s'en éloigne le moins possible[1].

256. Galvanomètre a indications rapides de MM. Marcel Deprez et d'Arsonval. — Lorsqu'un circuit traversé par un courant et un

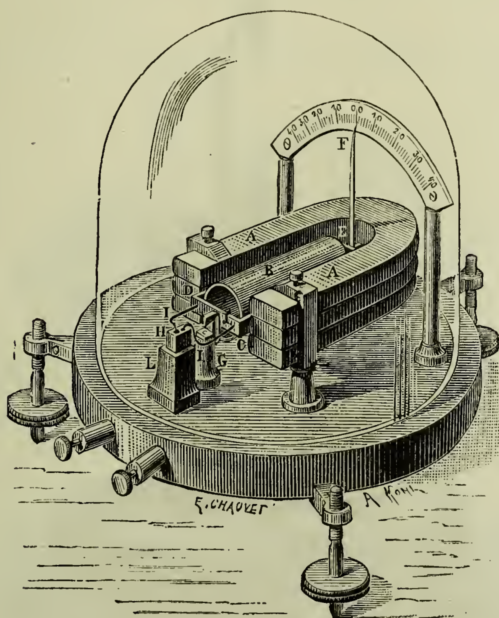


Fig. 176. — Galvanomètre Deprez et d'Arsonval. (*Lumière électrique.*)

aimant sont en présence, s'ils n'occupent pas la position qui correspond à l'équilibre, il y a mouvement relatif de l'un par rapport à l'autre, jusqu'à ce que cette position soit atteinte. Les appareils précédemment décrits comprenaient un aimant mobile par rapport au circuit : MM. Marcel Deprez et d'Arsonval ont construit un appareil

1. L'équation de la courbe, rapportée à l'axe de la bobine et à une perpendiculaire menée par son centre, est, d'après Sir William Thomson :

$$x^2 = (a^2y)^{\frac{2}{3}} - y^2$$

dans laquelle a mesure la distance OB.

dans lequel c'est au contraire l'aimant qui est fixe et le circuit qui se déplace.

Cet appareil (fig. 176) se compose d'un aimant en fer à cheval AA dont les branches sont écartées d'environ 30 millim., d'un tube de fer doux creux B occupant presque toute la longueur de l'espace compris entre les branches de l'aimant, et d'un diamètre de 25 millimètres; d'un cadre CED mobile en E et J autour de deux couteaux

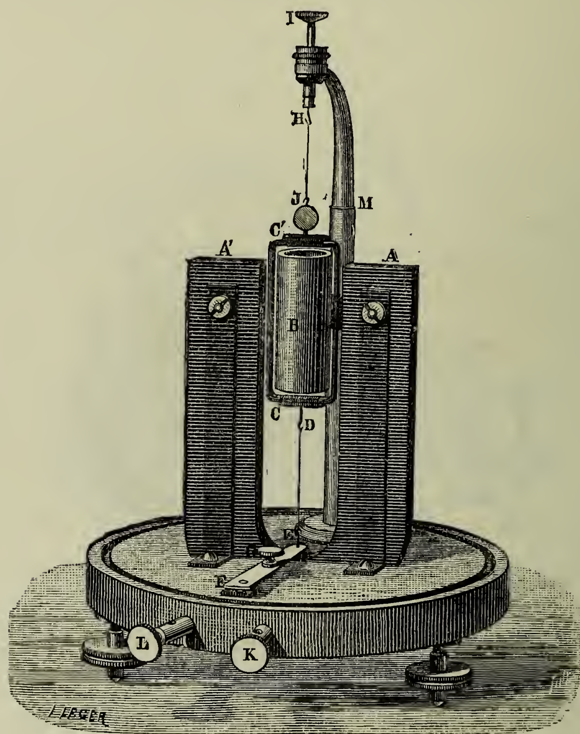


Fig. 177. — Galvanomètre Deprez et d'Arsonval. (*Lumière électrique.*)

dont les arêtes coïncident avec l'axe du tube. Ce cadre, qui porte une aiguille en paille, mobile sur un cadran gradué F, reçoit le courant par deux fils dont les extrémités, plongeant dans des godets remplis de mercure, sont également sur le prolongement de l'axe du tube; ces godets communiquent avec des bornes métalliques où viennent aboutir les extrémités du circuit. Le cadre mobile a son centre de gravité un peu au-dessous de l'axe de suspension, de telle sorte qu'à l'état d'équilibre stable il reste horizontal.

Le champ magnétique est très restreint comme étendue, entre

chaque branche de l'aimant et le cylindre de fer doux, mais très puissant. De plus, les lignes de force sont presque absolument perpendiculaires au cadre : aussi, quand celui-ci sera traversé par un courant, sera-t-il dévié avec énergie.

On emploie un cadre formé par une lame métallique unique ou par un fil très fin, et faisant un grand nombre de tours, suivant qu'il est nécessaire de faire usage d'un galvanomètre à résistance faible ou forte (241).

Cet appareil présente une grande sensibilité, ses indications sont très rapides; de plus elles ne sont pas influencées par le voisinage de masses magnétiques.

Dans un autre modèle, l'appareil est disposé verticalement, le

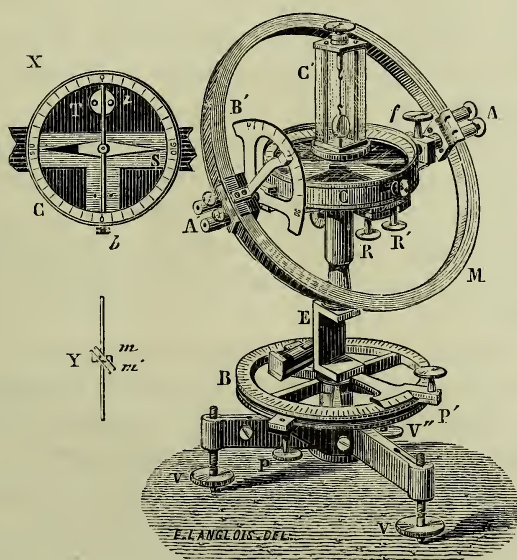


Fig. 178. — Boussole des Cosinus. (*Ducretet.*)

cadre est supporté par des fils métalliques tendus autour desquels il tourne et qui servent l'un de fil d'arrivée, l'autre de fil de départ du courant (fig. 177).

257. Boussole des cosinus. — Il peut être intéressant, au point de vue des démonstrations dans les cours, de pouvoir faire varier rapidement la sensibilité d'un galvanomètre. M. Ducretet, dans ce but, a disposé l'appareil auquel on donne le nom de *boussole des cosinus*, et qui est analogue à une boussole des tangentes dont le circuit, au lieu d'être invariablement placé dans un plan vertical,

peut s'incliner autour de son diamètre horizontal (fig. 178). Ainsi qu'il est facile de s'en assurer, la sensibilité diminue à mesure que le cercle s'incline et l'appareil devient inerte quand le plan du cercle est horizontal. On reconnaît aisément que, dans le cas d'une aiguille dont le pôle s'écarte peu du centre et qui est mobile dans un plan horizontal, la force résultant de l'action du courant n'agit que par sa composante horizontale : pour une même intensité du courant les tangentes des déviations de l'aiguille varient proportionnellement aux cosinus des angles du plan du circuit avec le plan vertical. C'est pour cette raison que cet appareil est désigné sous le nom de *boussole des cosinus*.

La boussole comprend deux circuits sur le cadre, un à fil fin, l'autre à gros fil : l'aiguille est suspendue à un fil de cocon et porte un miroir pour les mesures des petits angles par réflexion.

Ajoutons que l'appareil peut être utilisé comme boussole des sinus ou comme boussole des tangentes; mais la dernière disposition nous paraît préférable.

258. Galvanomètres de démonstration. — Dans quelques cas, la force qui tend à ramener l'aiguille déviée par le courant à une direction fixe n'est pas l'action magnétique terrestre, ni celle d'un barreau aimanté : ce peut être, par exemple, celle de la pesanteur. Les appareils basés sur cette disposition sont en général destinés à la démonstration.

On a, par exemple, employé la disposition suivante : le cadre multiplicateur est placé verticalement et le plan de chaque spire est également vertical. Une seule aiguille est placée à l'intérieur du cadre et peut tourner autour d'un axe horizontal porté sur des pivots : cet axe traverse l'une des faces du cadre et porte en dehors un index léger, une paille noircie, par exemple, dont l'extrémité se meut sur un arc divisé : les mouvements de cette extrémité sont d'ailleurs d'autant plus étendus et plus visibles que l'index est plus long. Un contre-poids fixé sur la moitié inférieure de l'aiguille donne au système une position stable d'équilibre lorsque le courant ne passe pas. On peut d'ailleurs faire varier la sensibilité entre certaines limites en déplaçant ce contre-poids.

M. Bourbouze a adopté une disposition un peu différente : la bobine EF (fig. 179) qui est très large et plate est placée verticalement, mais les spires sont dans des plans horizontaux. L'aiguille AB, qui est assez courte, est placée horizontalement dans ce cadre et peut tourner autour d'un axe horizontal constitué par deux couteaux de balance ; elle est suspendue de manière à être en équilibre stable

malgré qu'elle porte à sa partie supérieure un léger index assez long dont l'extrémité se déplace sur un arc divisé. De petits écrous mobiles sur des vis, deux horizontaux P,P' et un vertical P'', permettent d'amener exactement le fléau à l'horizontalité et de faire varier la sensibilité dans une certaine mesure. Lorsque le courant passe, l'aiguille est déviée, entraînant l'index dans une direction déterminée par le sens du courant.

Cet appareil est assez sensible, ce qui tient, d'une part, à ce que l'on peut diminuer sa stabilité en agissant sur la vis à axe vertical; d'autre part, à ce que le barreau aimanté ne sort pas de la bobine.

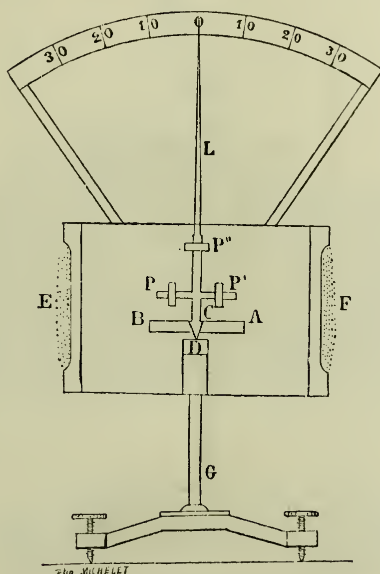


Fig. 179. — Galvanomètre de Bourbouze. (*Ducretet.*)

Si l'appareil est réglé de telle sorte que le barreau soit en équilibre horizontalement dans un azimut quelconque, il y sera également dans tous les azimuts (24); mais les conditions de stabilité et de sensibilité changeront avec l'azimut dans lequel on placera l'appareil, ainsi qu'il serait facile de le reconnaître par une discussion détaillée (Lissajous, *Journ. de Phys.*, I, 1872).

M. Ducretet a donné un modèle un peu modifié de cet appareil (fig. 180) dans lequel la bobine C reliée à une glissière M peut monter ou descendre dans de certaines limites, ce qui fait varier la sensibilité à volonté de 0 au maximum. Dans un modèle construit par M. Bréguet, la bobine avait la forme d'un cylindre circulaire à axe vertical : l'aiguille était remplacée par un barreau plat ayant

la forme d'un cercle et mobile autour d'un axe qui était perpendiculaire à la ligne des pôles. Un léger contre-poids placé en dessous ramenait ce barreau à l'horizontalité : un index placé perpendiculairement en son centre se déplaçait sur un arc gradué fixé au-dessus de la bobine (fig. 181).

259. Galvanomètre balistique. Mesure de l'intensité des courants instantanés. — Nous avons supposé jusqu'à présent que la durée des courants qu'il s'agit de mesurer n'est pas limitée et que l'aiguille arrive à une position d'équilibre; il n'en est pas toujours ainsi et

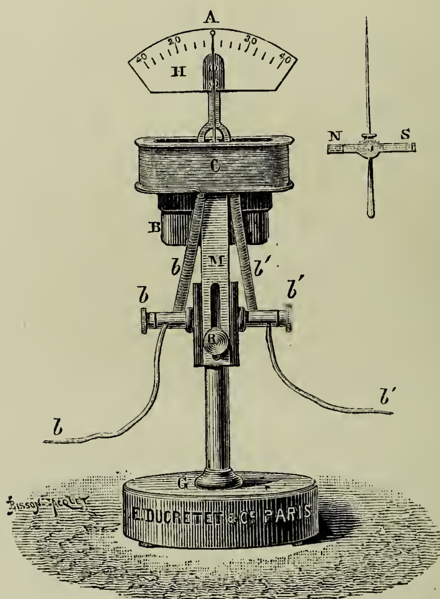


Fig. 180. — Galvanomètre de démonstration. (*Ducretet.*)

on peut avoir à considérer des courants qui durent pendant un temps très court, ce que l'on appelle des courants *instantanés*. Dans ce cas, on évalue l'intensité du courant par l'écart maximum produit par l'impulsion qui correspond à l'action du courant et qui, comme lui, n'a qu'une très courte durée.

La comparaison de ces écarts de première impulsion fait connaître la relation entre les intensités des courants qui les ont produits, à la condition que la durée du courant soit petite par rapport à celle de l'oscillation, ou plutôt la relation qui existe entre les quantités d'électricité qui ont traversé le galvanomètre, ces

quantités étant proportionnelles d'ailleurs aux intensités, si l'on peut admettre que le courant ait eu la même durée dans les deux cas. On démontre[1], en effet, que si q et q' représentent les quan-

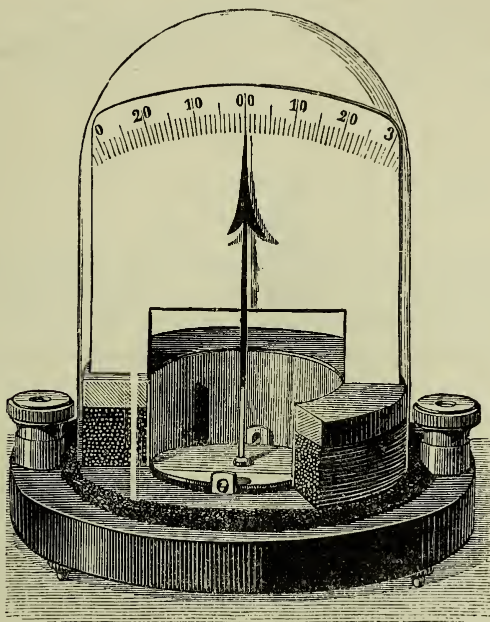


Fig. 181. — Galvanomètre Bréguet. (*Ducretet.*)

tités d'électricité, α et α' les angles d'impulsion qui leur correspondent, on a :

$$\frac{q}{q'} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha'}{2}}.$$

260. — On conçoit l'importance que présente dans ce cas la résistance de l'air, qui s'oppose au mouvement de l'aiguille et diminue l'impulsion en introduisant une force autre que celles qui interviennent dans la détermination de cette formule. Pour éviter cette influence autant que possible, MM. Ayrton et Perry ont construit un galvanomètre dans lequel le système aimanté est formé par plusieurs barreaux aimantés de petites dimensions, une quarantaine quelquefois, que l'on place parallèlement et dans la même

1. Soient i l'intensité moyenne du courant considéré, p l'intensité magnétique du pôle : la force agissant sur ce pôle sera Api, A étant une constante

orientation, et que l'on noie dans une masse de cire à laquelle on donne une forme sphérique, de manière à ce que, lors du mouvement, la résistance de l'air soit la moindre possible.

dépendant de l'appareil. Si l est la demi-longueur de l'aiguille (qu'il suffit de considérer, car les actions seraient identiques pour chaque moitié) et I le moment d'inertie de cette moitié, on a, pour déterminer l'accélération angulaire, l'équation :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{Api.l}{I}.$$

Comme le corps part du repos, on en déduit

$$\omega I = Api\theta l = Apql$$

θ étant le temps très court pendant lequel s'est produit l'action et q la quantité d'électricité qui a traversé le circuit pendant ce temps.

Pour déterminer ω, on note l'amplitude de l'oscillation α. Nous allons écrire que la demi-force vive du système, $\frac{1}{2}\omega^2 I$, au moment du départ est égale au

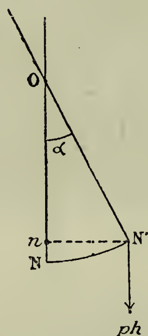


Fig. 182.

travail résistant de la force magnétique qui est $p \times h \times nN = phl(1 - \cos\alpha)$, en appelant h la composante horizontale de l'intensité magnétique. On aura donc :

$$\frac{1}{2}\omega^2 I = phl(1 - \cos\alpha) = 2phl \sin^2 \frac{1}{2}\alpha.$$

Ces deux équations permettent d'éliminer ω : la dernière donne

$$\omega = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{phl}{I}}$$

et substituant dans la première, on a :

$$q = \frac{2}{A} \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{Ih}{pl}}$$

Pour une autre expérience faite avec le même appareil, on aurait également :

$$q = \frac{2}{A} \sin \frac{\alpha'}{2} \sqrt{\frac{Ih}{pl}}$$

d'où l'on déduit la relation indiquée ci-dessus.

On peut, dans le cas de faibles déviations, négliger la résistance de l'air qui dépend de la vitesse, laquelle est faible alors ; dans ce cas on emploie la formule simplifiée :

$$\frac{q}{q'} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Il est toujours possible de se placer dans ces conditions, même avec des courants assez intenses; il suffit de shunter le galva-

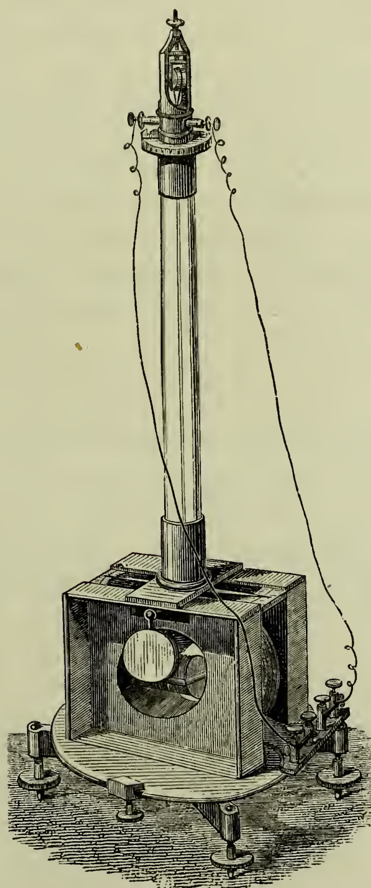


Fig. 183. — Électro-dynamomètre. (*Ducretet.*)

nomètre (252) de manière à ne le faire traverser que par une minime fraction du courant. On emploie alors un galvanomètre à miroir, le galvanomètre Thomson, par exemple : les déviations devant être petites ne sauraient être lues directement avec précision.

261. ÉLECTRODYNAMOMÈTRE. — Au lieu de déterminer l'intensité d'un courant par la mesure de son action sur un aimant, on peut faire cette détermination par son action sur un courant. On conçoit que l'on pourrait, d'après la formule d'Ampère, déterminer l'attraction exercée par un circuit circulaire traversé par un courant invariable[1], sur un autre circuit circulaire traversé par le courant qu'il s'agit d'évaluer. On voit aisément, d'ailleurs, que l'attraction serait proportionnelle à l'intensité du courant que l'on veut mesurer. Si l'on fait traverser le circuit par le même courant en expérience, l'attraction[2] variera comme le carré de l'intensité.

Dans l'électrodynamomètre de Weber (fig. 183), les circuits traversés par le courant sont des bobines cylindriques : l'une, qui est fixe, est creuse et c'est à son intérieur que se trouve la bobine mobile qui, lorsque l'on veut faire une mesure, est placée de telle sorte que son axe soit perpendiculaire à l'axe de la bobine fixe, les centres des bobines étant en coïncidence. Cette bobine est suspendue par deux fils fins d'argent qui constituent une suspension bifilaire et qui servent également à mettre la bobine mobile dans le circuit métal-

1. On démontre que l'action exercée par un courant circulaire de rayon R et d'intensité I sur un courant circulaire concentrique intérieur de rayon r et d'intensité i et perpendiculaire au premier est proportionnelle au produit

$$\frac{2\pi RI}{R^2} = \frac{2\pi I}{R}$$

qui représente l'action du cercle extérieur, et au produit $\pi r^2 i$ qui correspond à celle du cercle intérieur. Cette action est donc mesurée par

$$\frac{2\pi^2 r^2 Ii}{R}$$

si les quantités sont mesurées en valeur absolue.

Si le courant extérieur est constitué par une bobine présentant N tours, et le courant intérieur par une bobine de n tours, l'action est évidemment mesurée par

$$\frac{2\pi^2 r^2 NnIi}{R}.$$

Comme on connaît la valeur du couple du bifilaire pour une déviation donnée (231) on peut écrire l'équation qui correspond à l'équilibre. Dans le cas de l'électrodynamomètre, tel qu'il est ordinairement employé, on a $I = i$ et l'équation permet de calculer sa valeur.

2. L'intensité étant la même dans tous les points d'un même circuit, l'attraction exercée par un circuit traversé par un courant fixe, déterminé, I_0, sur un circuit traversé par le courant d'intensité I sera proportionnelle au produit $I_0 I$ (167); si le même courant traverse les deux circuits, on a $I_0 = I$ et l'attraction est proportionnelle à I^2.

lique qui est traversé par le courant et qui contient également la bobine fixe. Ces fils, qui ont une longueur de 50 centimètres, passent dans une ouverture réservée à la partie supérieure de la bobine fixe, et vont s'attacher à la partie supérieure à deux tiges métalliques implantées dans un disque d'ivoire que l'on peut déplacer micrométriquement, de manière à amener la bobine mobile à la position rigoureuse qu'elle doit occuper.

On peut, d'autre part, à l'aide de dispositions variables, tenir les fils de suspension plus ou moins rapprochés à la partie supérieure, de manière à pouvoir modifier le moment du couple de la suspension bifilaire.

Lorsque le courant passe, les bobines tendent à se placer parallèlement; la bobine mobile se meut donc jusqu'à ce qu'elle soit arrêtée par la réaction du bifilaire : l'angle dont elle a tourné est mesuré à l'aide d'un miroir lié à la bobine mobile comme nous l'avons déjà indiqué pour d'autres appareils.

Les courants mobiles étant dirigés par les aimants, cet appareil n'est pas indifférent au magnétisme terrestre. Mais outre que l'on peut diminuer cette influence en employant des courants très faibles, on peut l'annuler en plaçant dans le voisinage un aimant convenablement disposé.

Cet appareil a servi à vérifier les lois des courants d'Ampère; il peut servir pour effectuer des mesures d'intensité. Mais c'est surtout pour la mesure des intensités des courants alternatifs tels que les produisent les machines d'induction qu'il peut rendre des services. Lorsque le courant change de sens, le changement se produit dans les deux bobines à la fois, de telle sorte que, s'il n'y a pas de changement d'intensité, la position d'équilibre reste la même. Dans un galvanomètre soumis à de pareilles alternatives, l'aiguille, à cause de son inertie, resterait immobile au zéro pour peu que les changements fussent rapides.

262. Balances électriques. — Au lieu d'utiliser la propriété que possèdent les bobines traversées par les courants de se placer parallèlement, on peut, comme on l'a fait dans les balances électriques, évaluer les attractions ou répulsions qui s'exercent entre les extrémités de ces bobines placées parallèlement.

Dans la balance de Becquerel, deux petits aimants cylindriques bien égaux sont suspendus au-dessous des plateaux et pénètrent à l'intérieur de bobines faisant partie d'un même circuit, mais sur lesquelles le fil est enroulé en sens contraire. Lorsque le courant passe, l'un des aimants tend à s'enfoncer davantage, tandis que

l'autre est repoussé et tend à sortir. On met des poids dans l'un des plateaux, jusqu'à ramener l'équilibre, et la valeur de ces poids mesure la grandeur des actions produites, actions qui sont proportionnelles aux intensités du courant et peuvent dès lors les mesurer.

Dans la balance de Lallemand (fig. 184) qui, à cet égard, se rapproche davantage de l'électrodynamomètre, les attractions ou les répulsions se produisent entre quatre bobines, deux fixes B,B′ et deux mobiles S,S′; les mobiles sont portées aux extrémités d'un levier horizontal léger suspendu par un fil sans torsion, les deux bobines fixes sont placées en regard des spirales mobiles et de part et d'autre. On fait généralement passer le courant dans un sens tel qu'il y ait

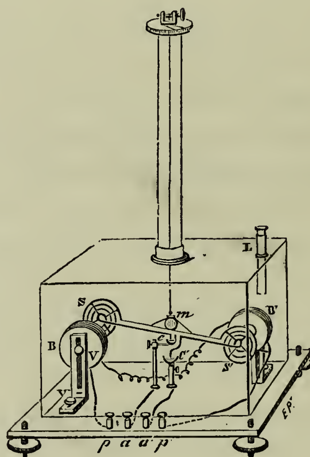


Fig. 184. — Balance de Lallemand. (*Ducretet.*)

répulsion, et l'on mesure la force manifestée en tordant le fil jusqu'à ramener les bobines à leur première position.

Dans un autre instrument, la balance de Debrun, la disposition de Lallemand a été légèrement modifiée : c'est un véritable fléau de balance qui porte deux bobines à ses extrémités; elles sont traversées par le courant. D'autre part, deux bobines fixes sont placées à peu de distance des précédentes, l'une verticalement au-dessus, l'autre verticalement au-dessous. Le sens de l'enroulement dans ces bobines est tel que leurs actions concourent pour faire incliner le fléau par suite de l'attraction qui s'exerce entre les bobines fixes et les bobines mobiles. On détermine, par des procédés différents suivant les cas, le poids qu'il faut appliquer à l'une des extrémités du fléau pour le ramener à sa position d'équilibre. Comme

pour l'électrodynamomètre, l'attraction dans ces conditions sera proportionnelle au carré de l'intensité du courant, si toutes les bobines sont placées dans le même circuit.

Ce modèle de balance électrique peut être utilisé pour les mesures d'intensité des courants alternatifs.

263. Mesure de l'intensité absolue d'un courant par les galvanomètres étalonnés. — Les indications des galvanomètres sont indépendantes de l'état magnétique de l'aiguille, parce que les deux forces antagonistes, l'action de la terre et celle du courant, sont l'une et l'autre proportionnelles à l'intensité magnétique de l'aiguille. Ces indications dépendent, par contre, de l'intensité du magnétisme terrestre ; mais, en un même point du globe, cette intensité varie lentement. On peut donc, à peu près au moins, considérer comme d'intensité égale deux courants qui, traversant successivement un même galvanomètre, produisent la même déviation, et l'on peut dès lors *étalonner* cet instrument, en le faisant traverser par un courant dont l'intensité *absolue* a été évaluée par des méthodes spéciales que nous indiquerons. On pourra ainsi graduer le galvanomètre en ampères ou fractions d'ampère, milliampères, suivant l'usage auquel il est destiné.

S'il s'agit d'évaluer l'intensité d'un courant qui traverse un circuit dont ne fait pas partie le galvanomètre, l'introduction du galvanomètre changera la résistance du circuit et diminuera l'intensité, de telle sorte que l'intensité qu'indiquera la déviation de l'aiguille sera plus faible que celle du courant primitif[1].

1. Soient I l'intensité du courant primitif, R la résistance de son circuit; on a :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Soit maintenant I' l'intensité observée dans le galvanomètre de résistance r que l'on a introduit dans le circuit : on a

$$I' = \frac{E}{R + r}$$

et par suite

$$\frac{I'}{I} = \frac{R}{R + r},$$

valeur toujours plus petite que 1. Comme on peut l'écrire sous la forme

$$\frac{I'}{I} = \frac{R}{1 + \frac{r}{R}},$$

on voit que I' sera d'autant plus près de I que $\frac{r}{R}$ sera plus petit.

Mais si la résistance du galvanomètre est très petite par rapport à celle du circuit, et l'on sera assuré qu'il en sera toujours ainsi en lui donnant une résistance très petite absolument, on pourra prendre à peu près l'intensité lue sur l'appareil comme valeur de l'intensité cherchée.

264. Étalonnage des boussoles et des galvanomètres. — En général, les galvanomètres ne donnent que des intensités relatives et non pas des valeurs absolues : ces déterminations comparatives, qui peuvent être suffisantes lorsqu'il s'agit de vérifier des lois, ne le sont plus dès qu'il s'agit d'évaluer la grandeur absolue de l'effet produit, comme il arrive lorsque l'on cherche une relation entre des effets différents.

On peut obtenir la valeur absolue d'un courant à l'aide d'une boussole des tangentes ou des sinus, à la condition d'avoir eu recours à un étalonnage préalable. Cette opération détermine la constante qui entre dans l'équation (248) : elle consiste à faire passer dans l'appareil un courant d'une intensité absolue que l'on puisse connaître, et pour y arriver on mesure la quantité d'électricité qui a traversé le circuit. Si le courant a été constant pendant la durée de l'opération, en appelant Q la quantité d'électricité évaluée en coulombs et t le temps en secondes, l'intensité I évaluée en ampères sera $\frac{Q}{t}$.

La mesure de la quantité d'électricité s'effectuera par la détermination du poids d'un métal déposé dans une électrolyse, comme nous l'indiquerons par la suite.

Si α est l'angle de déviation observé pendant le passage du courant, les équations

$$I = \frac{\varphi}{h} \operatorname{tg} \alpha$$

pour la boussole des tangentes,

$$I = \frac{\varphi}{h} \sin \alpha$$

pour la boussole des sinus, donneront la valeur du coefficient constant $\frac{\varphi}{h}$ qui servira par la suite, lorsque l'on connaîtra l'angle de déviation et que l'on voudra trouver l'intensité.

On pourra employer le même procédé d'étalonnage pour les appareils dans lesquels la déviation est proportionnelle à l'intensité, comme le magnétomètre de Weber et le galvanomètre de Thomson. Pour ce dernier, il faudra recommencer l'étalonnage à chaque

série d'opérations, parce que sa sensibilité varie très notablement avec la position de l'aimant directeur.

On conçoit également qu'il soit possible d'étalonner des galvanomètres quelconques; mais il faudra faire de nombreuses séries d'opérations, parce que la proportionnalité n'existe plus et que l'on ignore la loi qui, pour chaque appareil, lie les déviations aux intensités des courants : il sera donc nécessaire de déterminer directement l'intensité qui correspond à chaque degré de la graduation, ou du moins à un assez grand nombre pour que la proportionnalité puisse être acceptée approximativement entre deux des valeurs trouvées.

Il va sans dire que si l'on possède un galvanomètre étalonné, on peut en étalonner d'autres par comparaison. Il existe un certain nombre d'appareils qui sont ainsi disposés, et parmi ceux-ci les galvanomètres de Gaiffe, de Marcel Deprez, d'Ayrton et Perry.

265. Galvanomètre étalonné de Gaiffe. — M. Gaiffe a cons-

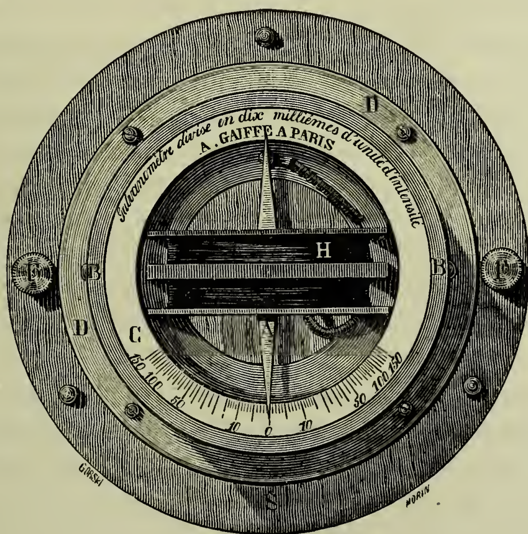


Fig. 185. — Galvanomètre de Gaiffe.

truit un galvanomètre étalonné qui se prête facilement aux mesures. Il se compose d'une bobine H (fig. 185), à l'intérieur de laquelle se meut une aiguille aimantée, aiguille invisible sur la figure. A cette aiguille est fixée perpendiculairement une aiguille légère servant d'index, et dont la pointe A se meut sur un cercle gradué C. Les extrémités des fils de cette bobine se trouvent reliées aux bornes F,

où l'on fera aboutir les extrémités des fils du circuit. La bobine et le cercle gradué sont mobiles, et peuvent tourner autour de leur centre, de telle sorte que l'on peut toujours placer la bobine dans le plan du méridien magnétique, ce dont on est assuré parce que la pointe de l'index se trouve alors en face du zéro des divisions. Quand le courant passe, l'aiguille est déviée et l'index vient s'arrêter devant l'une ou l'autre des divisions, dont le numéro indique l'intensité du courant.

Ces divisions ont été obtenues par comparaison ; elles ne sont pas égales, d'ailleurs, et décroissent très rapidement lorsque l'on s'éloigne du zéro. Les galvanomètres construits dans ce système sont destinés aux usages médicaux, et chaque division équivaut, tantôt à 0,0001, tantôt à 0,001 d'ampère.

Il est utile de remarquer que les divisions sont indépendantes du magnétisme de l'aiguille, parce que les deux forces qui interviennent, l'action du courant et celle de la terre, sont proportionnelles à cette quantité ; leur rapport, qui détermine la position de l'aiguille, n'en dépend pas.

La résistance de ce galvanomètre est petite par rapport à la résistance que présente le corps humain ; elle est de 10 ohms environ.

Les indications de ce galvanomètre sont évidemment liées à la valeur de l'intensité magnétique terrestre : cette quantité ne varie que très lentement avec le temps en un même point du globe.

266. Mesure des quantités d'électricité. — Le plus souvent la mesure des quantités d'électricité se déduit de la valeur du courant ; à cause de l'équation

$$Q = It$$

on voit que les quantités d'électricité qui circulent dans un même temps sont proportionnelles aux intensités des courants. Si le courant n'était pas constant, il faudrait évaluer l'intensité à chaque instant, ce qui ne peut évidemment se faire que par un appareil enregistreur traçant une courbe sur un papier se déroulant uniformément. Comme dans tous les appareils de ce genre, la valeur cherchée serait donnée par la mesure de l'aire de la courbe.

Cette disposition permettrait d'étudier toutes les variations du courant ; on cherche seulement à avoir la quantité totale, en général et l'on a recours aux actions chimiques.

Si l'on veut faire directement la comparaison des quantités d'électricité parcourant des circuits, il faut utiliser les décompositions électrochimiques. S'il s'agit d'un même électrolyte, les quantités de

métal mis en liberté sont proportionnelles aux quantités d'électricité.

On pourrait se servir d'un voltamètre et mesurer le volume de l'hydrogène dégagé; mais il y a à craindre la condensation du gaz, et il est préférable de se servir des dépôts métalliques qui, donnant lieu à des pesées, sont appréciables avec une grande exactitude : on se sert généralement soit d'une dissolution de sulfate de cuivre, soit d'une dissolution d'azotate d'argent.

Pour éviter la polarisation qui se manifeste dans les électrolyses, on place deux plaques identiques aux deux pôles, cuivre dans le sulfate de cuivre, argent dans l'azotate d'argent. Il se dissout autant de métal d'un côté qu'il s'en dépose de l'autre, les surfaces en présence restent identiques, et le bain liquide ne change pas de composition.

Dans un appareil d'une disposition ingénieuse, dû à M. Edison, les deux plaques sont portées aux extrémités d'un fléau qui s'incline alternativement dans un sens et dans l'autre dès que le dépôt de métal a atteint une valeur donnée. Le fait du changement d'inclinaison intervertit le sens du courant, de telle sorte que chaque plaque, à son tour, se dissout ou s'accroît en poids. Un compteur indique le nombre de fois que le changement s'est produit et, par suite, la quantité d'électricité qui a passé si l'on sait celle qui correspond à un mouvement de la balance. Comme nous le dirons, 1 coulomb produit le dépôt de $0^{gr},00033064$ de cuivre ou de $0^{gr},0011247$ d'argent : on peut donc faire des mesures absolues.

Lorsque le courant à mesurer est énergique, on en dérive seulement une partie que l'on fait passer dans le compteur; on shunte celui-ci, par conséquent.

On peut utiliser ces mesures pour l'étalonnage des galvanomètres : pour effectuer cette opération, on emploie, par exemple, deux ou trois Daniell à grande surface que l'on fait agir pendant deux heures sur une dissolution de cyanure double de potassium et d'argent (on peut employer également le sulfate de cuivre) ; on vérifie directement par l'observation de la boussole que le courant est resté constant. S'il a été recueilli un poids P de métal, le nombre de coulombs sera

$$\frac{P}{0,001\,124\,7};$$

le nombre serait

$$\frac{P}{0,000\,330\,64},$$

si l'on avait opéré avec un sel de cuivre. On conçoit que l'opération présente une plus grande exactitude par l'emploi d'un sel d'argent qui, pour le passage d'un même nombre de coulombs, donne un dépôt d'un plus grand poids.

Ces nombres donnent immédiatement l'intensité du courant; si la durée de l'opération a été de t secondes, on a, dans le cas où l'on a employé l'argent :

$$I = \frac{P}{0{,}001\,1247\,t}.$$

Si l'opération avait duré un nombre h d'heures, on aurait :

$$I = \frac{P}{0{,}001\,1247 \times h \times 3600} = \frac{P}{4{,}04892\,h}$$

le poids P étant évalué en grammes.

267. Mesure de la force électromotrice. — Nous avons indiqué (124) un moyen de comparer par la méthode d'opposition les forces électromotrices de deux piles ou de deux éléments. Cette méthode n'est pas d'un emploi commode dans la pratique, et l'on fait généralement cette détermination par d'autres procédés qui sont basés, soit sur l'emploi des électromètres, soit sur l'emploi des galvanomètres.

Les électromètres permettent d'évaluer la différence de potentiel qui existe entre les deux pôles, et c'est cette différence de potentiel qui mesure la force électromotrice. Ils présentent l'avantage que l'opération s'effectue sans que la pile soit placée dans un circuit fermé, sans qu'elle travaille par conséquent. Les galvanomètres permettent d'arriver plus rapidement au résultat.

Tantôt on fait usage de galvanomètres divers qui ont été directement étalonnés et dont les indications font connaître, par une seule lecture, le nombre de volts que représente la force électromotrice en expérience; tantôt on compare cette force électromotrice avec celle d'un étalon, pile type qui reste identique à elle-même. On ne fait pas usage d'étalon ayant la valeur exacte d'une unité : on se sert seulement de piles dont la force électromotrice soit connue en volts. Les piles dont on fait le plus souvent usage sont un élément de Daniell dont la force électromotrice est de $1^{v},079$; et mieux encore celle de Latimer Clark dont la force électromotrice est de $1^{v},457$ et qui est plus invariable, surtout en circuit ouvert.

268. Mesure de la force électromotrice d'une pile par les

GALVANOMÈTRES. — La méthode dite par *opposition*, qui permet de comparer la force électromotrice d'une pile ou d'un élément à celle d'un étalon de faible force électromotrice dont on peut réunir un nombre suffisant, présente l'avantage suivant : elle n'exige la connaissance d'aucune résistance, les piles ne travaillent pas en circuit fermé, car il suffit de s'assurer si, oui ou non, le galvanomètre subit une impulsion; enfin on n'a aucune déviation à mesurer, et l'on opère par réduction au zéro du galvanomètre, ce qui est une condition favorable (251).

Cette méthode donne évidemment la valeur absolue de la force électromotrice cherchée, si l'on connait la force électromotrice des éléments auxiliaires employés.

Si l'on connaît les résistances de deux piles que l'on veut comparer l'une à l'autre, on peut opérer différemment. Soit E la force électromotrice de la pile la plus faible, π sa résistance, soient E' et π' les éléments correspondants de l'autre pile. On met la première dans un circuit de résistance R et comprenant un galvanomètre de résistance γ : on observe une certaine déviation au galvanomètre (qui, comme toujours dans les recherches analogues, peut être shunté). On enlève la première pile et on la remplace par la seconde, l'intensité du courant augmente, mais on la ramène à sa valeur primitive en introduisant dans le circuit une résistance auxiliaire ρ. L'intensité étant la même dans les deux cas, on a :

$$\frac{E}{\pi + R + \gamma} = \frac{E'}{\pi' + R + \rho + \gamma},$$

d'où l'on déduit le rapport de E à E'.

Cette méthode exige la connaissance des valeurs des résistances des divers éléments ou conducteurs.

269. MÉTHODE DE POGGENDORF. — On met dans un circuit qui contient un galvanomètre G (fig. 186) les deux éléments P et P' en opposition et l'on shunte par une boîte de résistance B : on introduit une résistance ρ jusqu'à ce que le galvanomètre soit au zéro. Soient alors les mêmes données que précédemment : on démontre [1] que l'on a

$$\frac{E}{E'} = \frac{\rho}{\pi' + \rho}.$$

1. D'après les formules des dérivations, le courant produit dans le circuit qui contient le galvanomètre par la pile P' a une intensité égale à

$$\frac{E'\rho}{\pi'\rho + \pi'(\pi + \gamma) + \rho(\pi + \gamma)};$$

Dans cette opération, il convient de ne pas laisser travailler les piles en circuit fermé, car elles pourraient se polariser; on évite cet inconvénient à l'aide de clefs multiples placées sur les circuits et que l'on manœuvre simultanément de manière à fermer d'abord le circuit de la pile P′ et seulement alors celui de la pile P.

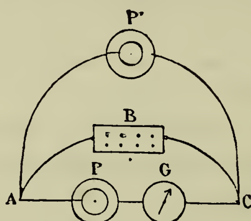


Fig. 186.

Il suffit dans ce cas, comme l'indique la formule, de connaître la résistance π' de la pile P′ et non celle de la pile P.

Clarke a imaginé une méthode qui se rapproche de la précédente : elle est plus compliquée.

270. Méthode de Wheatstone. — Une pile est introduite dans un circuit qui contient un galvanomètre et produit une déviation α; on introduit une résistance auxiliaire ρ, la déviation devient α', moindre que α.

On remplace la première pile par la seconde, et l'on fait varier la résistance du circuit, sans la mesurer, de manière à obtenir la même déviation α; on introduit une résistance accessoire ρ' qui amène la déviation à la valeur α', précédemment trouvée.

On a alors[1]

$$\frac{E}{E'} = \frac{\rho}{\rho'}.$$

le courant produit dans le même galvanomètre par la pile π a pour intensité

$$\frac{E(\pi' + \rho)}{(\pi + \gamma)\rho + (\pi + \gamma)\pi' + \pi'\rho}.$$

Comme les éléments sont en opposition et que le galvanomètre est ramené au zéro, c'est que ces valeurs sont égales, ce qui conduit immédiatement à

$$E'\rho = E(\pi' + \rho).$$

1. Les données étant les mêmes que précédemment, on a immédiatement :

$$I = \frac{E}{R + \gamma + \pi} \qquad I = \frac{E'}{R' + \gamma + \pi'}$$

$$I' = \frac{E}{R + \gamma + \pi + \rho}. \qquad I' = \frac{E'}{R' + \gamma + \pi' + \rho'}$$

271. Méthode de Wiedemann. — On place dans le circuit d'une boussole des tangentes ou d'un galvanomètre gradué, les deux piles que l'on veut comparer à la suite l'une de l'autre et dans le même sens, on a un courant I; on les met alors en opposition, le courant devient I'; les forces électromotrices étant E et E', on a[1].

$$\frac{E}{E'} = \frac{I + I'}{I - I'}.$$

272. Mesure des différences de potentiel et des forces électromotrices par les galvanomètres étalonnés. — Les méthodes que nous venons d'indiquer permettent de comparer, et par suite de mesurer la force électromotrice d'une pile, d'un élément déterminé. On peut se proposer au contraire, d'une manière plus générale, de mesurer une différence de potentiel entre deux points : on arrivera à ce résultat, soit par l'emploi des électromètres, soit par les galvanomètres étalonnés. Ces méthodes appliquées aux pôles d'une pile en circuit ouvert donneront sa force électromotrice.

Soient deux points A et B (fig. 187) entre lesquels existe une différence de potentiel D; réunissons-les par un conducteur comprenant

équations qui peuvent s'écrire :

$$R + \gamma + \pi = \frac{E}{I} \qquad R' + \gamma + \pi' = \frac{E'}{I}$$

$$R + \gamma + \pi + \rho = \frac{E}{I'} \qquad R' + \gamma + \pi' + \rho' = \frac{E'}{I'}$$

On en tire immédiatement

$$\rho = E\left(\frac{1}{I'} - \frac{1}{I}\right) \qquad \rho' = E'\left(\frac{1}{I'} - \frac{1}{I}\right)$$

d'où enfin

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{E}{E'}.$$

1. On a évidemment, en effet :

$$I = \frac{E + E'}{\pi + \pi' + R + \gamma} \qquad I' = \frac{E - E'}{\pi + \pi' + R + \gamma}$$

donc

$$\frac{I}{I'} = \frac{E + E'}{E - E'}$$

d'où l'on tire

$$\frac{E}{E'} = \frac{I + I'}{I - I'}.$$

un galvanomètre. Il s'établira dans le conducteur un courant dont le galvanomètre signalera l'existence et pourra même mesurer l'intensité : en général, l'établissement même du conducteur aura modifié les conditions de l'expérience et la différence de potentiel se sera abaissée. Le courant produit dans le conducteur est proportionnel à la différence de potentiel qui existe entre les deux extrémités A et B et son intensité permettra de faire connaître cette différence de potentiel moindre que D. Mais si le conducteur introduit a une très grande résistance, on pourra considérer que les indications fournies par le galvanomètre donneront sensiblement la valeur de D même.

On conçoit, en effet, que l'introduction, entre deux points, d'une résistance très grande comparativement à celle qui existait auparavant ne doit presque rien changer aux conditions d'écoulement de l'électricité et que, dès lors, la différence de potentiel restera à peu près la même que celle qui existait avant l'introduction du galvanomètre[1]; l'intensité du courant, pour un même conducteur, étant

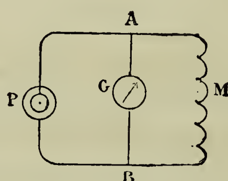


Fig. 187.

1. Soient, en effet, E la force électromotrice qui donne naissance au courant, D la différence de potentiel entre les deux points A et B, π la résistance de la partie de circuit APB qui contient la source du courant, Λ la résistance de l'autre partie AMB. On a immédiatement :

$$\frac{D}{E} = \frac{\Lambda}{\Lambda + \pi}.$$

Unissons les points A et B par un fil contenant le galvanomètre G et soit γ la résistance de cette partie du circuit. La distribution des potentiels sera modifiée; soit D′ la différence qui existe alors entre les points A et B. Il vient :

$$\frac{D'}{E} = \frac{\dfrac{1}{\dfrac{1}{\Lambda} + \dfrac{1}{\gamma}}}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{\Lambda} + \dfrac{1}{\gamma}} + \pi} = \frac{\Lambda\gamma}{\Lambda\gamma + \Lambda\pi + \gamma\pi}.$$

proportionnelle à la différence des potentiels aux deux extrémités, on voit que cette intensité pourra servir à mesurer la différence de potentiel.

Si les deux points choisis sont les pôles de la pile, la valeur de la différence de potentiel ainsi déterminée donnera sensiblement la valeur de la force électromotrice.

Il faut employer des appareils spéciaux dont nous allons décrire

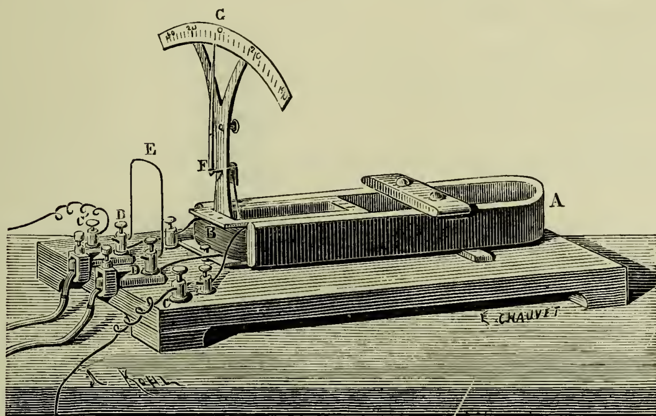


Fig. 188. — Galvanomètre Marcel Deprez. (*La lumière électrique.*)

les principaux : en général, ils sont disposés de manière à pouvoir mesurer également des intensités de courants.

273. Galvanomètre Marcel Deprez. — On trouve dans cet appareil d'intéressantes dispositions spéciales qui le caractérisent : l'existence d'un champ magnétique intense d'abord, qui le rend

On tire de là :

$$\frac{D'}{D} = \frac{\gamma(\Lambda + \pi)}{\gamma(\Lambda + \pi) + \Lambda\pi},$$

ce qui montre que D′ est toujours plus petit que D. Mais comme on peut mettre cette expression sous la forme

$$\frac{D'}{D} = \frac{\Lambda + \pi}{\Lambda + \pi + \frac{\Lambda\pi}{\gamma}}$$

on voit que si le terme

$$\frac{\Lambda\pi}{\gamma}$$

est très petit (et par suite γ très grand), D′ sera presque égal à D.

indépendant de l'action terrestre; puis la substitution d'une aiguille de fer doux à l'aiguille aimantée, cette aiguille de fer doux étant aimantée par suite de sa présence dans le champ magnétique.

Voici maintenant la disposition pratique :

Le champ magnétique est celui qui existe entre les deux branches d'un aimant en U dont l'épaisseur perpendiculairement à son plan est grande (fig. 188). L'aiguille est remplacée par une pièce dite *en arête de poisson* et constituée par une lame de fer de 100 milli-

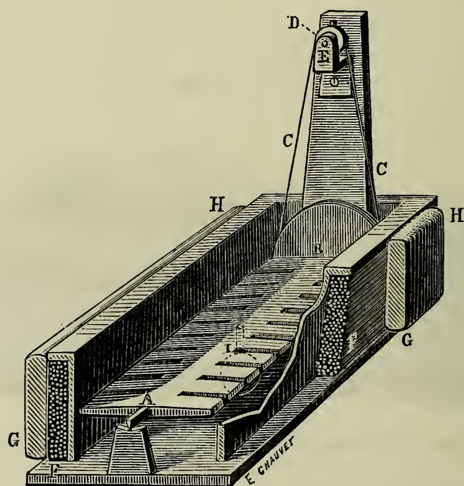


Fig. 189. — Détails du Galvanomètre Deprez. (*Lumière électrique.*)

mètres de longueur sur 30 de largeur, portant de distance en distance de forts traits de scie allant presque jusqu'à l'axe et qui la scindent en une dixaine d'aiguilles solidaires: cette pièce est mobile autour d'un axe horizontal constitué par des couteaux A, B (fig. 189) ; à l'aide d'un contre-poids, cette pièce reste horizontale lors de l'équilibre. Elle est polarisée par son voisinage de l'aimant et, lorsqu'elle tourne, jusqu'à 10°, conserve à peu près la même position par rapport aux branches de l'aimant. Un cadre de fil isolé F (fig. 189) est disposé entre l'aimant et l'arête de poisson : lorsqu'il est traversé par un courant, cette pièce est déviée, et, à cause de la faible déviation, on peut admettre que celle-ci est proportionnelle à l'intensité du courant.

En réalité, il y a deux circuits, l'un à faible résistance (quatre tours d'une lame de 10 millimètres carrés de section), l'autre à forte résistance, constitué par un fil très fin et très long. On se sert suivant le cas de l'un ou de l'autre circuit.

Les déviations de l'*arête* de poisson sont amplifiées dans le rapport de 1 à 5 et transmises à une aiguille mobile sur un arc gradué par l'intermédiaire de deux poulies B, D dont les diamètres sont dans ce même rapport et sur lesquelles passe un fil fin C, C disposé de manière à ne pouvoir glisser et à ne point produire de frottement.

Les indications de cet appareil sont très rapides, l'aiguille n'oscille presque pas; elles ne sont pas absolument rigoureuses; mais elles le sont assez pour les besoins de l'industrie.

Cet appareil est destiné spécialement à donner des mesures absolues, il faut donc qu'il ait été étalonné à l'avance : il permet de mesurer à volonté les différences de potentiel, forces électromotrices, ou les intensités des courants.

La graduation se fait par comparaison avec des valeurs absolues préalablement déterminées.

Pour la force électromotrice, par exemple, on emploie une pile à grande surface et dont la différence de potentiel entre les deux pôles représente un nombre connu E de *volts*. Le circuit très résistant du galvanomètre étant mis en communication avec ses deux pôles, l'aiguille sera déviée. Cette déviation δ permettra de connaître celle $\frac{\delta}{E}$ qui correspondrait à 1 volt puisqu'il y a proportionnalité. Si la déviation obtenue était trop grande, ce que l'on recherche dans la construction, on la ramènerait à la valeur fixée en introduisant une résistance complémentaire qui serait déterminée par tâtonnement.

Pour effectuer l'étalonnage relatif à l'intensité, on constitue un circuit comprenant une pile quelconque, le galvanomètre à graduer, en faisant usage du circuit peu résistant, et une bobine de résistance de 1 *ohm* exactement. En même temps, on détermine, à l'aide d'un autre galvanomètre, par exemple, la différence de potentiel E aux deux extrémités de la bobine : on sait que, puisque la résistance du circuit est de 1 ohm, l'intensité I du courant de la bobine évaluée en ampères est représentée par la force électromotrice E évaluée en volts, elle a d'ailleurs la même valeur dans tout le circuit; si δ' est la déviation pour cette intensité, elle sera $\frac{\delta'}{I}$ pour 1 ampère.

En réalité cette dernière opération n'exige pas deux galvanomètres, parce que M. Marcel Deprez a reconnu expérimentalement que si l'on a mesuré les déviations correspondant respectivement à deux courants passant chacun dans l'un des circuits du galvanomètre, et qu'on les fasse passer simultanément, la déviation sera la somme ou la différence suivant le sens (somme algébrique) des déviations précédentes. On conçoit aisément dès lors que, pour cette graduation, on

mesurera la force électromotrice avec le galvanomètre gradué en volts et que, sans y rien changer, on fera passer le courant dans l'autre circuit et qu'on lira l'accroissement de déviation, qui donnera ce que nous avons appelé δ'.

274. Ammètre et voltmètre de MM. Ayrton et Perry. — MM. Ayrton et Perry ont disposé un galvonomètre destiné à donner rapidement la mesure de l'intensité ou de la force électromotrice : ils ont nommé ces appareils respectivement *Ammètre* (pour Ampère-mètre) et *Voltmètre*. Ils ont la même disposition et ne diffèrent que par la résistance.

Le galvanomètre est formé d'un aimant en fer à cheval dont les branches portent deux armatures de fer doux N et S, destinées à concentrer entre elles un champ magnétique puissant. Entre ces pièces se trouve placée horizontalement une petite aiguille aimantée dont la position n'est pas influencée par l'action de la terre qui est très minime en présence de celle de l'aimant. Entre les branches de l'aimant et de part et d'autre de l'aiguille se trouve une bobine sur laquelle est enroulé le fil conducteur. Lorsqu'il sera traversé par le courant, celui-ci agira sur l'aiguille qu'il déviera de sa position d'équilibre et qui s'inclinera d'un angle plus ou moins considérable suivant l'intensité du courant. Mais, à cause de la grande intensité du champ magnétique, l'aiguille arrivera presque instantanément à sa position d'équilibre; elle vibrera pour ainsi dire lorsqu'elle sera à cette position, mais n'oscillera pas.

Un index est lié à l'aiguille et son extrémité se meut sur un arc divisé dont la graduation est obtenue comme nous allons l'expliquer.

Nous dirons d'abord que le fil qui est enroulé sur la bobine est, en réalité, un câble formé de dix fils égaux et que l'on peut, immédiatement, à l'aide d'un commutateur spécial, réunir en quantité ou en tension (ou, si l'on préfère, parallèlement ou en série). Cette disposition permet de graduer l'appareil avec un seul élément de pile, bien qu'il puisse servir pour des courants intenses.

S'il s'agit d'un ammètre, la résistance de chaque fil est environ de 0,03 ohms, de telle sorte qu'elle est 0,3 ohms si les fils sont montés en tension et 0,005 s'ils sont réunis en quantité (la valeur théorique serait seulement de 0,003 mais elle est augmentée par la résistance des petits conducteurs qui sont à l'intérieur de l'instrument). La forme et les dimensions sont telles que jusqu'à 40° environ les déviations de l'aiguille sont proportionnelles aux intensités.

Pour graduer l'appareil, on se sert d'un élément dont la force électromotrice est connue et l'on place les fils en tension. A l'aide

d'une ingénieuse méthode on peut faire l'étalonnage avec ce seul élément de pile : comme il y a proportionnalité, la graduation est donc établie pour le cas où les fils seront montés en tension ; l'appareil pourra alors servir pour les courants peu intenses. Au contraire, on réunira les fils en quantité en tournant le commutateur et la même graduation servira, seulement les degrés représenteront une intensité dix fois plus forte que dans le premier cas[1].

Dans le voltmètre, les fils sont très résistants : chacun a, dans les modèles les plus récents, une résistance de 200 ohms : la résistance totale est donc 2000 ohms si les fils sont en tension et 20 ohms

1. Soit E la force électromotrice connue de l'élément dont π est la résistance qui n'a pas besoin d'être déterminée. Soient R la résistance de l'un des fils, I l'intensité du courant qui passe lorsque ces fils sont réunis en tension, D l'angle dont est déviée l'aiguille et K une constante. On a, à cause de la proportionnalité :

$$I_1 = KD_1 = \frac{E}{\pi + 10R}.$$

On ajoute dans le circuit une résistance de 1 ohm ; soient I_2 et D_2 l'intensité et la déviation ; il vient de même :

$$I_2 = KD_2 = \frac{E}{\pi + 10R + 1}.$$

Enfin, si l'intensité était I, la déviation correspondante D serait donnée par $I = KD$. Eliminant K et $(\pi + 10\,R)$ entre ces trois équations, il vient aisément :

$$K = \frac{D_1 D_2}{E(D_1 - D_2)}$$

et par suite on peut calculer la déviation D qui correspondra à un courant I donné :

$$D = I\,\frac{E(D_1 - D_2)}{D_1 D_2},$$

ce qui permettra de faire la graduation.

Il est évident que si le même courant passait à travers un seul fil l'action serait 10 fois plus faible, c'est-à-dire qu'un courant de I ampères donnerait une déviation qui serait seulement :

$$d = \frac{I}{10}\,\frac{E(D_1 - D_2)}{D_1 D_2}.$$

Dans ce cas, il est préférable de faire passer le courant dans les fils réunis en quantité : l'action resterait la même si le courant ne variait pas. Mais l'indication fournie par le galvanomètre se rapprochera plus de la valeur que prendrait le courant si l'appareil n'était pas dans le circuit, puisque la résistance qu'il introduit sera moindre.

s'ils sont en série. On gradue l'appareil par un procédé analogue, mais inverse de celui que nous avons décrit, en employant une faible force électromotrice, les fils étant en quantité, tandis que l'on met ces fils en tension pour effectuer la mesure d'une force électromotrice un peu puissante[1].

275. Mesures des forces électromotrices par les condensateurs. — Considérons un condensateur dont une des armatures est à la terre et mettons l'autre en communication avec le pôle d'une pile dont le second pôle est également à la terre. Le condensateur se chargera et la quantité d'électricité qu'il contiendra dépendra du potentiel du pôle. Si on décharge le condensateur et qu'on le recharge avec une autre pile, la quantité d'électricité sera différente, en général, et les quantités d'électricité seront justement proportionnelles aux potentiels des pôles considérés, potentiels qui mesurent les forces électromotrices puisque les autres pôles communiquent avec la terre.

La mesure des quantités d'électricité se fait à l'aide du galvanomètre balistique (259); il faut que le conducteur qui met en commu-

1. La graduation se fait d'une manière analogue à celle que nous avons indiquée ci-dessus. On a, les notations étant les mêmes :

$$I_1 = KD_1 = \frac{E}{\pi + \frac{R}{10}}$$

puisque les 10 fils sont réunis en quantité. On introduit alors dans le circuit une résistance égale à $\frac{R}{10}$; on a de même :

$$I_2 = KD_2 = \frac{E}{\pi + 2\frac{R}{10}}.$$

Soit maintenant I′ l'intensité du courant produit par une différence E′ de potentiel existant entre les deux bornes de l'appareil dont les fils sont réunis en tension ; on a :

$$I' = \frac{E'}{10R}.$$

Mais on a $KD' = 10\,I'$, car il y a 10 fois plus de longueur de fil que précédemment. En éliminant π, R et K entre ces équations, il vient :

$$E' = D' \times 10E\,\frac{D_2 - D_1}{D_1 D_2}.$$

ce qui permettra de graduer l'appareil.

nication le conducteur avec le sol soit très résistant pour que la durée du courant ne soit pas trop brève.

On fait généralement usage, comme condensateur, de l'étalon ordinaire, le microfarad ou même le tiers d'un microfarad.

276. Mesure des forces électromotrices par les électromètres. — Nous venons d'indiquer comment, à l'aide de galvanomètres étalonnés, il est possible de mesurer la force électromotrice d'une pile; c'est-à-dire comment on peut comparer une force électromotrice, une différence de potentiel donnée avec une autre force électromotrice définie à l'avance. Cette méthode est particulièrement commode pour le cas où il s'agit de piles, c'est-à-dire d'appareils produisant et *entretenant* une certaine différence de potentiel : elle ne serait pas applicable au cas où la différence de potentiel est due à une différence de charges électriques entre deux corps, charges électriques qui arriveraient très rapidement à s'équilibrer si on les réunissait par un corps conducteur.

Dans ce cas, qui correspond aux mesures relatives à l'électricité statique, le galvanomètre ne peut pas servir et il faut avoir recours à d'autres appareils, à des électromètres notamment. Ces électromètres permettront d'ailleurs de faire également les mesures pour les piles dont la force électromotrice est manifeste lors même qu'il n'existe pas de courant.

Il y a même un avantage réel à employer les électromètres dans certains cas : les piles se polarisent par leur fonctionnement même (137) c'est-à-dire que, par suite des actions chimiques inverses, la force électromotrice appréciable diminue lors de la production du courant. Au point de vue pratique, industriel, c'est bien cette force électromotrice diminuée, seule réellement utilisable, qu'il est intéressant de connaître. Mais s'il s'agit, au contraire, d'une comparaison scientifique, exacte, avec un étalon déterminé, c'est la force électromotrice initiale qu'il faut observer : il faut donc alors éviter d'avoir besoin, pour la mesurer, de lui faire produire un courant, et l'on doit opérer alors avec un électromètre.

277. Électromètre a quadrants; modèle de M. Mascart. — L'électromètre de M. Mascart est basé absolument sur le même principe que celui de Sir William Thomson dont il est un modèle simplifié qui se prête à toutes les mesures électriques pour lesquelles celui-ci pourrait être employé.

Les parties importantes de l'électromètre sont renfermées dans une boîte cylindrique en métal B (fig. 191) montée sur un trépied à vis

calantes, sur lequel elle peut tourner ou sur lequel on peut la fixer dans une position invariable, à l'aide d'une vis de pression. Ce cylindre présente, vers sa partie supérieure, des fenêtres vitrées qui permettent d'examiner les pièces situées intérieurement; plus bas, une large porte mobile P, à charnières, sert à introduire un vase en verre R contenant de l'acide sulfurique destiné à maintenir l'air absolument sec. Il existe deux ouvertures l'une circulaire, dans laquelle est enchassée une lentille L, et l'autre rectangulaire G fermée par une lame plane à faces parallèles. Au centre de la base supérieure se trouve une ouverture surmontée d'un tube *u* de verre ou de métal dans lequel se trouve le fil suspenseur.

Dans la cage, et à peu près à la hauteur des fenêtres, on voit une boîte (fig.190) formée par quatre quadrants ou secteurs creux et suspendue au couvercle par des colonnettes en verre. Les secteurs sont réunis deux à deux, en diagonale, par des fils recouverts de substance isolante, et chaque couple de secteurs ainsi constitué est mis en

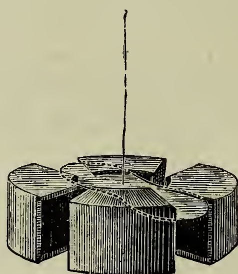


Fig. 190.

communication par des fils avec des bornes fixées sur le couvercle.

A l'intérieur de cette boîte se trouve une plaque légère ou aiguille en aluminium, découpée en forme de 8. Elle est suspendue par un double fil de cocon qui, inférieurement, passe dans un crochet porté par cette plaque et dont les deux extrémités supérieures s'attachent à deux crochets montés sur des écrans traversés par une vis *v* à deux pas en sens contraire : en tournant cette vis, les crochets s'éloignent plus ou moins; l'écartement des brins du fil de suspension varie à volonté, entre certaines limites, ce qui permet de régler les déviations de l'aiguille de manière qu'elles restent petites. D'autre part, la plaque en 8 supporte inférieurement une tige de platine munie d'un miroir *m* et dont l'extrémité inférieure porte deux ou trois petites tiges implantées normalement qui plongent dans l'acide sulfurique du vase desséchant, ce qui, d'une part, amortit les oscillations; d'autre part, un

autre fil de platine, plongeant également dans l'acide, communique à une borne fixée sur le couvercle et par l'intermédiaire de laquelle on peut charger l'aiguille à volonté.

Nous n'avons pas à insister sur le fonctionnement de l'appareil,

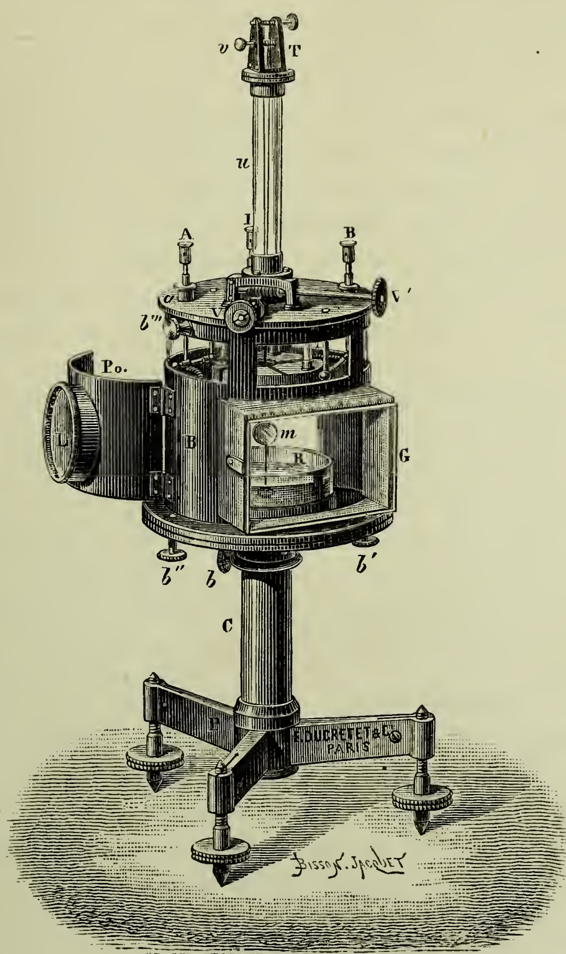


Fig. 191. — Électromètre. (*Ducretet.*)

dont nous avons donné la théorie (63); nous nous bornerons à quelques détails sur la pratique expérimentale.

Au début, on met toutes les pièces de l'appareil en communication avec le sol, ce qui les amène au même potentiel : on arrive facilement à ce résultat parce que les bornes placées sur le couvercle, outre le mode de serrage ordinaire des fils, présentent un petit

chapeau métallique qui, lorsqu'il est abaissé, établit la communication entre les tiges métalliques aboutissant aux bornes et le couvercle et par suite également avec le sol. Lorsque, au contraire, le chapeau est relevé, le contact n'a pas lieu. On place l'aiguille de manière que son axe coïncide avec un plan de séparation des secteurs, au moins approximativement; puis l'on charge les deux couples de secteurs à des potentiels égaux et de signes contraires. On y arrive à l'aide d'une pile (40 éléments Daniell de petites dimensions, par exemple) dont le milieu a été mis en communication avec le sol et dont on réunit les pôles aux bornes B et B′ après que l'on a relevé les chapeaux. L'aiguille, étant restée au potentiel zéro, ne doit subir aucune déviation, si elle occupe effectivement la position axiale, par raison de symétrie. Si elle est déviée, on la ramène en faisant tourner le tube qui porte la suspension et qui peut recevoir, à volonté, un mouvement lent ou un mouvement rapide.

Par l'intermédiaire de la borne A, dont on a relevé le chapeau, on fait communiquer l'aiguille avec le corps dont on veut étudier le potentiel: il y a une déviation que l'on observe à l'aide d'une règle divisée dont on regarde l'image, à travers une lunette, faite sur le miroir porté par l'aiguille (l'ouverture circulaire de la boîte cylindrique est alors fermée par la glace à faces parallèles).

En général, on veut comparer les potentiels de deux corps différents X et Y : on les met successivement en contact avec l'aiguille et l'on observe deux déviations x et y dont le rapport est le rapport cherché des potentiels.

Le mode d'action absolument symétrique de cet appareil permet des retournements à l'aide desquels on élimine les causes d'erreur inhérentes à l'appareil.

Pour que l'expérience se fasse dans de bonnes conditions, il faut que les diverses pièces soient bien isolées. On a une idée de la perfection de l'isolement en observant le temps nécessaire pour que l'aiguille, déviée de sa position d'équilibre, y revienne pour des conditions électriques données.

L'acide sulfurique qui absorbe la vapeur d'eau doit être renouvelé de temps à autre. Il peut même, si l'on n'y prend garde, augmenter assez de volume par cette absorption pour déborder et détériorer les parties métalliques sur lesquelles il se déverse.

278. Électromètre capillaire de Lipmann. — Cet appareil, qui sert à mettre en évidence et à mesurer de très faibles différences de potentiel, est basé sur la propriété observée par M. Lipmann que la

constante capillaire du mercure en contact avec l'acide sulfurique change avec l'état électrique.

On démontre cette propriété à l'aide d'un tube *abc* (fig. 192) triplement recourbé qui, à une extrémité, s'élargit et forme un réservoir *b* et, à l'autre, est librement ouvert. On verse du mercure dans la large branche d'où il passe dans le tube capillaire pour s'y arrêter à un niveau inférieur (dépression capillaire); on remplit la partie supérieure du tube d'acide sulfurique et l'on plonge l'extrémité dans un vase *f* contenant également de l'acide sulfurique surmontant une couche de mercure. Deux fils de platine sont plongés dans le mercure, l'un en *c* à la partie inférieure du tube capillaire, l'autre en *d* dans le vase *f*. Lorsque ces fils sont mis en communication l'un avec l'autre, le ménisque prend une position bien déterminée et fixe.

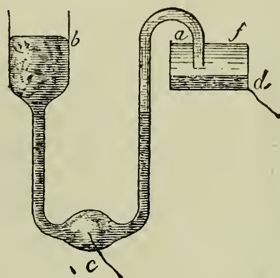


Fig. 192.

Mais si ces fils sont séparés et mis en communication avec des corps à des potentiels différents, avec les pôles d'un élément Daniell, par exemple, le ménisque change de position pour s'arrêter à un autre état d'équilibre. On pourra ramener le ménisque à sa première position en faisant varier le niveau du mercure dans l'autre branche; et la grandeur de cette variation mesurera le changement capillaire, qui est en relation directe avec la différence de potentiel.

Sur ce principe, M. Lipmann a basé un appareil très sensible : il se compose d'un tube vertical terminé inférieurement par une pointe effilée plongeant dans une partie renflée contenant de l'eau acidulée au fond de laquelle se trouve une couche de mercure dans laquelle aboutit un fil de platine, tandis qu'un autre fil est fixé dans le tube vertical que l'on remplit de mercure jusqu'à une certaine hauteur. Le mercure ne s'écoule pas à la partie inférieure, par suite de la capillarité : on note sa position exacte à l'aide d'un microscope qui est dirigé sur la partie effilée et dont on amène le fil horizontal du

réticule au niveau du ménisque. Lorsque les deux fils sont portés à des potentiels différents, ce ménisque est déplacé; on le ramène en faisant varier la pression au-dessus de la colonne mercurielle. A cet effet, le tube en verre qui contient celle-ci communique par l'intermédiaire d'un tube de caoutchouc avec un réservoir à air que l'on comprime par la rotation d'une vis; d'autre part, un manomètre à siphon mesure la pression exercée dans le réservoir et, par suite, celle qui ramène le ménisque à sa position primitive.

Lorsque l'appareil doit servir à effectuer des *mesures*, comme il

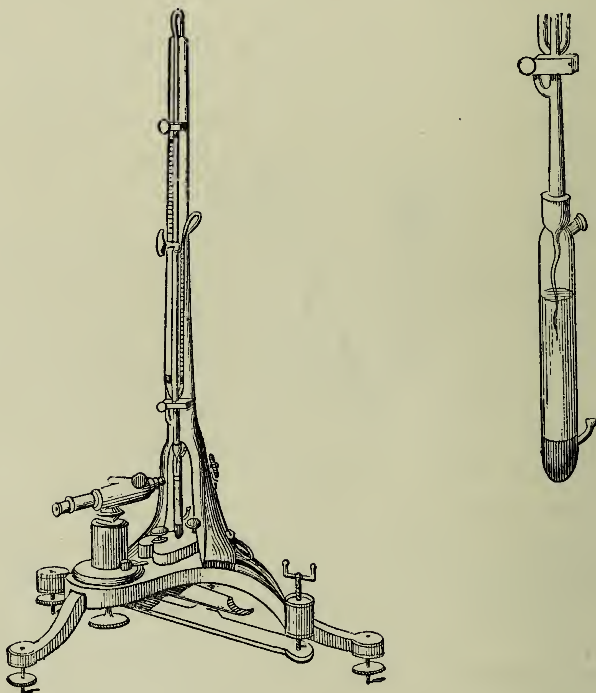


Fig. 193. — Electromètre capillaire Lipmann.

n'y a pas proportionnalité entre les différences de potentiel et les variations capillaires, on doit graduer l'appareil par comparaison.

M. Debrun a imaginé un électromètre capillaire d'un usage plus commode : il comprend en somme les mêmes éléments que le précédent; mais le tube capillaire dans lequel se produisent les changements que nous venons de signaler est presque horizontal. Il en résulte que les modifications capillaires, qui ont pour effet de

modifier la dénivellation capillaire, produiront un déplacement longitudinal de la colonne mercurielle d'autant plus grand que le tube sera plus voisin de l'horizontalité. On comprend aisément qu'il soit possible de faire varier la sensibilité, en modifiant l'inclinaison de ce tube.

Dewar a construit un électromètre formé par deux réservoirs reliés par un tube capillaire horizontal ; du mercure remplit ces vases et le tube, au milieu duquel on introduit une goutte de liquide (eau acidulée). La bulle reste immobile si le mercure est au même potentiel dans les deux vases ; elle se déplace si les potentiels ont des valeurs différentes, et le sens du déplacement dépend du sens de cette différence.

279. Mesureur d'énergie. — Nous avons dit (151) que la quantité de chaleur dégagée dans un conducteur traversé par un courant d'intensité I, entre deux points présentant une différence de potentiel E, est proportionnelle au produit EI. A cause des relations d'équivalence qui existent entre la chaleur et les divers modes de manifestation de l'énergie, la quantité d'énergie disponible dans ce conducteur est proportionnelle à ce même produit. Il n'y a pas besoin d'insister sur l'intérêt qu'il peut y avoir à connaître cette valeur, dans nombre de circonstances, surtout au point de vue des applications industrielles.

Une disposition qui présente quelque analogie de forme avec l'électrodynamomètre a été indiquée par Sir William Thomson et par M. Marcel Deprez, pour évaluer cette énergie disponible dans le conducteur qui réunit les deux pôles d'une pile ou les deux bornes d'une machine.

Concevons, en effet, que l'une des bobines d'un électrodynamomètre de peu de résistance soit placée dans le circuit : nous savons qu'elle sera traversée par le courant d'intensité I qui traverse ce circuit. Supposons que l'autre bobine, d'une très grande résistance, au contraire, soit placée de manière à relier directement les pôles de la pile ou les bornes de la machine. Nous avons dit que, dans ces conditions, elle est traversée par un courant dont l'intensité est proportionnelle à la différence E de potentiel de ces deux pôles; cette intensité sera donc $I' = KE$, K étant une constante qui ne dépend que de l'appareil. L'attraction entre les deux bobines dépend du produit $I I'$ et sera représentée par KEI. L'attraction exercée entre les bobines sera donc proportionnelle à l'énergie disponible et, si l'on a calculé les constantes de l'appareil, la déviation pourra permettre de mesurer cette énergie.

Dans le cas où l'on n'aurait pas mesuré cette constante, les attractions manifestées dans deux expériences seraient en tout cas proportionnelles aux énergies disponibles.

280. Mesure des capacités. — La mesure du rapport des capacités de deux conducteurs peut s'effectuer de plusieurs manières : nous en décrirons deux seulement.

La méthode la plus employée consiste à charger les deux conducteurs au même potentiel, puis à déterminer les quantités qu'ils contiennent alors ; les capacités seront dans le rapport des quantités. La mesure des quantités se fait en déchargeant le conducteur à travers un galvanomètre dont l'autre fil communique à la terre. La mesure de l'angle d'impulsion (259) permet de comparer les courants instantanés qui se produisent alors : on peut se servir, comme nous l'avons dit, soit d'un galvanomètre balistique, soit d'un galvanomètre à miroir ordinaire convenablement shunté.

On peut encore opérer comme suit. Soient deux conducteurs de capacité C et C′ qu'il s'agit de comparer. Le premier étant isolé est chargé et amené à un potentiel que l'on mesure E ; on le met alors en contact avec l'autre conducteur isolé, et primitivement à l'état neutre. La charge se partage et le potentiel s'abaisse, il devient E′. La quantité d'électricité était d'abord CE, elle est maintenant $(C+C')E'$ et, comme elle n'a pas changé, on a :

$$CE = (C + C')E'$$

d'où l'on tire :

$$\frac{C}{C'} = \frac{E'}{E - E'}.$$

Il est évident que si C′ est connu, on calculera C par cette égalité. Mais cette méthode exigeant une mesure de potentiel est moins commode que la précédente, qui est exclusivement employée dans la pratique.

281. Étalon de capacité. Microfarad. — Nous avons défini la *capacité* en mesure absolue, et nous avons donné l'unité pratique qui a été choisie : le *farad* ; c'est la capacité d'un conducteur dont le potentiel serait élevé de 1 volt, si on lui communiquait une quantité d'électricité égale à 1 coulomb.

Cette unité est énorme : on peut s'en faire une idée par le fait que notre globe terrestre a seulement une capacité de 0,000708 farads. Aussi a-t-on dû faire choix, pour construire un étalon, d'un sous-multiple de l'unité pratique : c'est le *microfarad*, qui vaut 0,000001

(1 millionième) du farad. C'est la véritable unité dont on fait usage; nous avons dit que l'on avait dû adopter le farad, quoique manifestement cette unité soit trop grande, afin que les relations fondamentales (208) qui existent entre les unités absolues fussent également applicables aux unités pratiques.

Les condensateurs sont des corps qui présentent une grande capacité sur des dimensions moyennes : la capacité d'un condensateur s'obtient en mettant l'une des armatures en communication avec le sol et en chargeant l'autre jusqu'à ce que le potentiel atteigne 1 volt. La quantité d'électricité introduite mesure la capacité.

L'étalon de capacité que l'on emploie usuellement est moindre même que le microfarad ; c'est le plus souvent le *tiers* d'un microfarad. C'est un condensateur formé de feuilles d'étain circulaires alternant avec des feuilles de mica : le nombre et la surface de ces feuilles varient avec l'épaisseur des feuilles de mica. L'ensemble de ces lames est renfermé dans une boîte d'ébonite : les feuilles d'étain sont reliées entre elles en deux séries comprenant, l'une les feuilles de rang impair, l'autre les feuilles de rang pair. Les conducteurs qui correspondent à ces deux séries se terminent, à la base supérieure, à deux bornes : il y a en outre deux bandes métalliques qui se terminent à peu de distance l'une de l'autre et entre lesquelles on peut introduire une cheville qui maintient les deux armatures au même potentiel, lorsque l'on ne fait pas usage de l'appareil.

Dans les mesures de capacité, le condensateur étalon communique d'une part avec le sol, et d'autre part avec l'un des pôles d'un élément Daniell dont l'autre pôle est également à la terre.

282. Mesure des résistances. — Nous avons indiqué (116) comment il est possible d'arriver par la méthode de *substitution* à reconnaître l'égalité de deux résistances et, par conséquent, à mesurer l'une d'elles si l'autre est évaluée en unités connues. Le pont de Wheatstone (125) fournit également un moyen de comparer deux résistances et conduit à une mesure, si l'une d'elles est aussi connue en unités.

Après avoir défini l'unité de résistance, et avoir convenu de faire choix d'une unité pratique, l'*ohm*, il est nécessaire d'avoir une représentation pratique de cette unité et même des multiples et sous-multiples de cette unité. C'est ce que l'on obtient par la construction de bobines de résistance étalonnées.

283. Bobines de résistance. — Une bobine de résistance est essentiellement constituée par un fil dont la longueur, le diamètre

et la nature ont été choisis de manière que sa résistance ait aussi exactement que possible, à une température déterminée, une valeur fixée à l'avance. Ce fil, recouvert de matières isolantes, est enroulé sur un cylindre : afin d'éviter les actions des spires sur les spires voisines, le fil est enroulé après avoir été plié en deux, de telle sorte que dans deux spires contiguës le courant circule en sens contraire ; les deux extrémités sont libres à l'une des bases de la bobine ou sont reliées à deux bornes.

Pour les bobines à grande résistance surtout, il convient d'employer non du fil de cuivre, mais du fil de maillechort qui est beaucoup plus résistant ; il présente, en outre, cet avantage que pour une

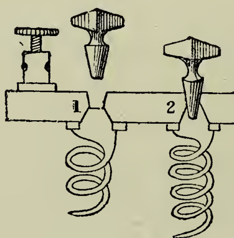


Fig. 194.

même variation de température sa conductibilité varie beaucoup moins que celle du cuivre.

Il faut éviter de faire passer un courant trop intense dans une bobine de résistance : il aurait pour effet d'échauffer le fil, de brûler ou de fondre les matières isolantes qui recouvrent les spires et les séparent les unes des autres, et de détruire la bobine qui devrait être refaite entièrement.

284. Caisses de résistance ou boîtes de résistance. — Une boîte de résistance se compose de plusieurs bobines de résistance fixées à une planchette qui forme le couvercle d'une sorte de caisse dans laquelle ces bobines sont ainsi renfermées. Sur la planchette se trouvent des blocs rectangulaires de laiton, placés à la suite de manière à former deux ou plusieurs lignes parallèles, séparées les unes des autres par un intervalle de 1 millimètre environ et qui portent une entaille courbe à chaque extrémité. Chaque bloc reçoit une des extrémités des fils de chacune des bobines voisines, à l'exception des blocs extrêmes qui ne reçoivent qu'un fil mais qui portent des bornes à l'aide desquelles la boîte sera introduite dans le circuit (fig. 194).

D'autre part, on a des chevilles métalliques, en laiton également, qui peuvent s'introduire dans les cavités formées par les entailles courbes de deux blocs voisins et établissent ainsi une communication entre ces blocs.

Supposons que toutes ces chevilles soient en place et que l'on introduise la boîte dans un circuit traversé par un courant : le courant, entre les deux bornes extrêmes, pourra passer à travers la suite des blocs et des chevilles qui, vu leurs dimensions, ne présentent qu'une résistance négligeable, et en même temps à travers les fils des bobines dont la résistance est très grande par rapport à celle des blocs; on peut donc la négliger absolument. La boîte alors ne modifie en rien le circuit primitif : on dit qu'elle est en *court circuit*.

Mais supposons que l'on enlève une cheville : le courant ne pourra pas passer de l'un à l'autre des blocs que réunissait cette cheville et sera obligé de traverser le fil de la bobine dans son entier, c'est-à-dire que la résistance du circuit sera augmentée de la résistance de la bobine, résistance qui est connue et qui est indiquée sur la boîte par un chiffre placé en face de l'intervalle des deux blocs.

Les boîtes de résistance ont des dispositions diverses, tant en ce qui concerne la suite des bobines employées que leur groupement. Le plus souvent, les bobines forment la série suivante, analogue à celle usitée pour les poids :

$$1^{\text{ohm}},\quad 2^{\text{ohm}},\quad 2,\quad 5,\quad 10,\quad 20,\quad 20,\quad 50,\quad 100,\quad 200,\quad 500,\quad 1000,\ \text{etc.}$$

Quelquefois, pour les boîtes comprenant peu de bobines, celles-ci sont rangées sur une seule ligne; plus souvent, elles sont disposées sur deux rangs parallèles : dans ce cas, il n'aboutit qu'un fil aux quatre blocs qui forment les extrémités de ces deux rangées. Deux des blocs, situés d'un même côté, portent les bornes : à l'autre extrémité les blocs se recourbent et se terminent en face l'un de l'autre comme dans les rangées parallèles. Quand on met une cheville, les deux bobines extrêmes sont reliées directement, comme si elles étaient en ligne, à la suite. Mais si l'on enlève la cheville, il n'existe plus aucune communication entre les deux rangées, le courant est interrompu. On met en face de cette solution de continuité le signe ∞.

Enfin, pour certains usages particuliers, les bobines peuvent pré-

senter un groupement spécial qui correspond à un mode d'emploi déterminé : nous en donnerons un exemple[1].

285. Emploi du pont de Wheatstone pour la mesure des résistances. — La méthode employée pour la comparaison de deux résistances est presque toujours le pont de Wheatstone dont nous avons indiqué le principe (125); nous avons dit que, dans un parallélogramme ABCD dont les deux sommets sont maintenus à des

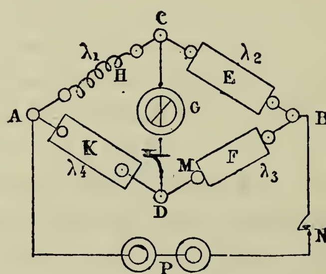


Fig. 195.

potentiels différents, par exemple en les mettant en communication avec les deux pôles d'une pile, ce qui donne naissance à deux courants allant de A vers B, l'un par C, l'autre par D, si la diagonale n'est traversée par aucun courant, c'est qu'il existe, entre les quatre résistances, la relation :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_4} = \frac{\lambda_2}{\lambda_3}$$

ce qui permet de déterminer l'une des quantités quand on connaît les trois autres.

Voici, dans la pratique, la disposition générale de l'expérience : les deux pôles de la pile communiquent avec deux des sommets A et B du parallélogramme; soit en AC la résistance inconnue λ_1; le côté AD comprend une boîte de résistance dont on fera varier le

1. Afin de réduire au minimum le nombre des bobines, on peut leur donner des résistances qui soient dans les rapports des termes de la progression géométrique :

1, 2, 4, 8, 16...

On reconnaît que cette série permet d'obtenir toutes les valeurs possibles, parce que l'on sait que, dans le système de numération binaire, on peut écrire tous les nombres avec les deux seuls caractères 0 et 1.

nombre de bobines en court circuit; les deux côtés CB et DB comprennent deux résistances λ_2 et λ_3, déterminées à l'avance et invariables pendant la durée d'une mesure. Enfin un galvanomètre est intercalé dans la diagonale CD : une clef M maintient le circuit ouvert lorsqu'elle est abandonnée à elle-même; le circuit se ferme quand on appuie.

L'expérience consiste évidemment à déterminer la valeur de la résistance λ_4 pour laquelle, l'aiguille du galvanomètre ne se déplaçant pas, le courant n'existe pas entre C et D. Pour arriver à ce résultat, on met la boîte de résistance en court circuit, c'est-à-dire que l'on supprime la résistance λ_4 : l'aiguille est déviée dans un certain sens qui sera caractéristique des cas où le courant ira de D en C, c'est-à-dire où la résistance en K sera trop faible (comme vérification, on pourrait rompre le circuit de la boîte de résistance, ce qui donnerait pour λ une résistance infinie, et l'aiguille devrait être déviée en sens contraire). On enlève alors une cheville de la bobine de résistance, voisine de la valeur que l'on doit trouver si on connaît celle-ci approximativement, et l'on appuie sur la clef : l'aiguille est déviée et, suivant le sens de l'impulsion qui lui est communiquée, on sait si la résistance introduite est trop faible ou trop forte. Supposons que l'on ait débouché la bobine 500 ohms et que l'aiguille ait été déviée contrairement à ce qu'elle avait été au début : la résistance de 500 ohms est donc trop considérable. On replacera la cheville correspondante, on enlèvera la cheville de la bobine 200 et l'on appuiera sur la clef; supposons que l'aiguille soit encore déviée du même côté, c'est que la résistance 200 ohms est trop forte. On la supprimera du circuit et l'on y introduira la résistance 100 ohms : si celle-ci, après le contact de la clef M, donne à l'aiguille une impulsion opposée aux précédentes, c'est que la résistance λ_4 doit être plus grande que 100 ohms, qu'elle est, par suite, comprise entre 100 et 200 ohms. On essaiera la résistance totale 150 ohms et l'on saura si elle est trop petite ou trop grande, c'est-à-dire si la résistance λ_4 doit être comprise entre 150 et 200 ohms ou bien entre 100 et 150 ohms. En continuant ainsi, on arrivera à trouver deux résistances n et $n + 1$ différant entre elles de 1 ohm et qui donnent naissance dans le galvanomètre à des courants de sens contraire, ce qui prouve que la résistance cherchée est comprise entre ces deux valeurs qui la mesurent à 1 unité près, l'une par excès, l'autre par défaut.

On a d'une manière générale,

$$\lambda_1 = \lambda_4 \frac{\lambda_2}{\lambda_3}.$$

On peut donc écrire

$$n.\frac{\lambda_2}{\lambda_3} < \lambda_1 < (n+1)\frac{\lambda_2}{\lambda_3}.$$

L'erreur commise est certainement plus petite que $1^{\text{ohm}} \times \frac{\lambda_2}{\lambda_3}$ Il résulte de là que pour déterminer λ_1 avec la plus grande exactitude possible, il faut que $\frac{\lambda_2}{\lambda_3}$ soit le plus petit possible. Si λ_3 est égal à 10,100,1000... fois la valeur de λ_2 l'erreur commise sur λ_1 sera moindre que 0,1 ; 0,01 ; 0,001... d'ohm.

286. Détails d'expérience. — Le galvanomètre n'est pas employé ici pour mesurer un courant, mais pour déceler l'existence de ce courant, c'est-à-dire l'existence d'une différence de potentiel entre les points B et C : il suffit dès lors qu'il soit sensible, et le galvanomètre à miroir est d'un emploi très satisfaisant. Il suffit qu'il reste un instant très court dans le circuit, et c'est pourquoi l'emploi d'une clef à ressort est avantageuse.

La source du courant peut être quelconque : en général, on prend quelques éléments d'une pile à courant constant, celle au bichromate de potasse, par exemple. Il n'est pas nécessaire que le courant passe d'une manière continue, il suffit qu'il existe au moment où le galvanomètre sera introduit dans le circuit : il y a donc intérêt à interrompre le courant, sauf à cet instant, pour éviter la polarisation. On établit donc une clef ou interrupteur dans ce circuit.

Enfin il est nécessaire que le courant soit établi un instant avant que le galvanomètre soit introduit dans le circuit, afin d'éviter les extra-courants ou autres courants induits qui pourraient alors prendre naissance.

Pour satisfaire à ces diverses conditions, on emploie avantageusement une *double clef* (fig. 196) composée de trois lames de ressort N, N', M fixées par une extrémité sur un bloc isolant en ébonite, où elles sont en communication avec des tiges métalliques auxquelles sont reliés des fils aboutissant pour N et N' aux fils de la pile et pour M à l'une des bornes du galvanomètre. Une quatrième tige D placée sous l'extrémité opposée des ressorts ferme le circuit du galvanomètre. A l'extrémité libre la lame N porte, par-dessus un bouton sur lequel on appuie avec la main, et par dessous un contact de platine, la lame N' portant par-dessus un contact de platine, au dessous du précédent. Sur la lame M est une petite masse isolante Q et par

dessous un contact de platine qui se trouve au-dessus de la quatrième tige métallique.

Lorsque l'on appuie sur le bouton, les deux lames N et N' se trouvent en contact et le circuit de la pile se trouve fermé; puis le mouvement se communique à la lame M qui un instant après rencontre la tige D, ce qui ferme le circuit du galvanomètre. Les communications sont donc bien établies dans l'ordre où il convient, sans erreur possible : le courant direct, notamment, ne peut jamais passer dans le galvanomètre, car il ne peut y avoir contact entre les lames M et N'.

L'emploi du pont de Wheatstone exige l'établissement préalable

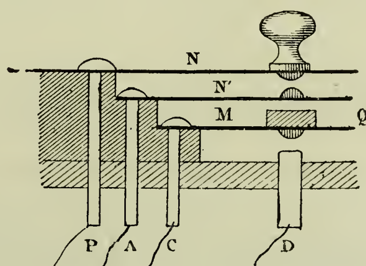


Fig. 196.

de résistances d'un rapport donné λ_2 et λ_3 dans deux branches. On se sert généralement de boîtes de résistance dont les bobines présentent une disposition spéciale qui permet l'établissement de ces résistances; nous reproduisons dans la figure 197 la disposition d'une expérience préparée avec une de ces boîtes. Bien que la forme générale paraisse assez différente, on retrouve aisément les éléments du pont de Wheatstone, les lettres ayant la même signification que précédemment.

Dans le cas de la figure, si l'on suppose que l'on est arrivé à l'état d'équilibre, on a $\lambda_4 = 182^{\text{ohms}}$ et, d'autre part, on a $\lambda_2 = 100$ et $\lambda_3 = 1000$. Donc, il vient

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_3} = 0{,}1$$

et par suite la résistance cherchée du conducteur H est $18,^{\text{ohms}}2$ à $0,^{\text{ohm}}1$ près.

Les deux branches BC et BD constituent ce que l'on appelle les *branches de proportion*, et permettent de donner de diverses façons

au rapport $\frac{\lambda_2}{\lambda_3}$ les valeurs 1 ou 0,1 ou 0,01 ou les inverses. Suivant les cas, on prendra pour obtenir ces rapports les unes ou les autres de ces valeurs.

Il est facile de se rendre compte que, dans la figure relative à la théorie de l'appareil, on arrive absolument à la même relation lors de l'équilibre, en plaçant le galvanomètre sur le conducteur qui relie les sommets A et B, et la pile sur celui qui relie les sommets

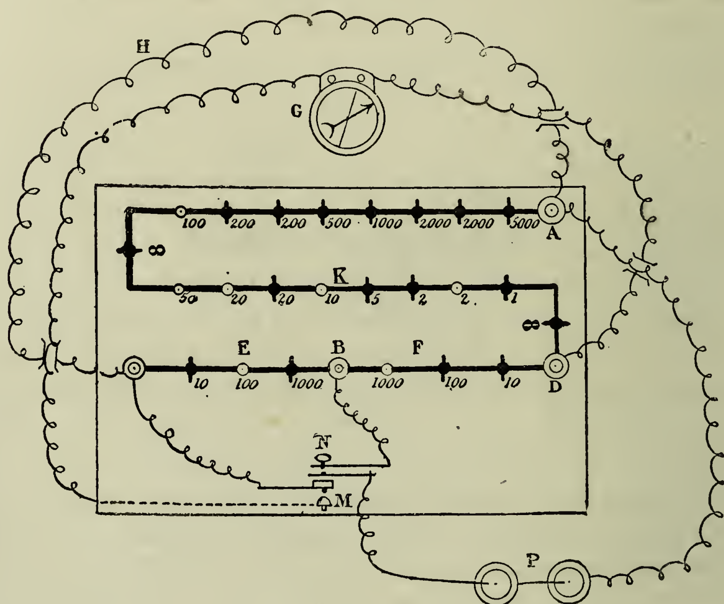


Fig. 197.

C et D : il peut y avoir lieu de discuter dans chaque cas particulier quelle solution est préférable.

Afin d'éviter les pertes de temps résultant des oscillations prolongées de l'aiguille du galvanomètre, on peut, au début, augmenter la force directrice de l'aiguille en plaçant dans le voisinage un aimant convenablement choisi : les déviations seront encore suffisamment nettes parce que l'on sera loin de l'équilibre. On éloignera l'aimant auxiliaire au fur et à mesure que l'on sera plus près de cet état. Le galvanomètre de Thomson se prête bien à cette opération.

287. Rhéocorde. — Dans le cas où l'on veut déterminer une résistance faible avec une assez grande exactitude, on emploie également la méthode du pont de Wheatstone; mais on ne se sert plus

de boîtes de résistance pour arriver à l'équilibre, on emploie alors le rhéocorde ou le rhéostat de Wheatstone. On peut employer un appareil spécial, mais la disposition précédente peut servir, à la condition de remplacer les bobines qui servent à obtenir l'équilibre par l'un de ces instruments.

Dans le rhéocorde, la résistance est évaluée par la longueur d'un fil bien calibré, de résistance connue, un fil de platine, par exemple. Ce fil est tendu parallèlement à une règle divisée en millimètres; il reçoit le courant par une borne à une extrémité. Le long de la règle divisée se meut un curseur métallique qui est maintenu en contact, par un point, avec le fil de platine et par lequel sort le courant; suivant la position de ce curseur, une longueur plus ou moins grande du fil de platine sera dans le circuit et sa résistance sera mesurée par sa longueur.

Dans quelques rhéocordes, il y a deux fils de platine f, f' (fig. 198) tendus parallèlement, le long desquels glisse un curseur m formé

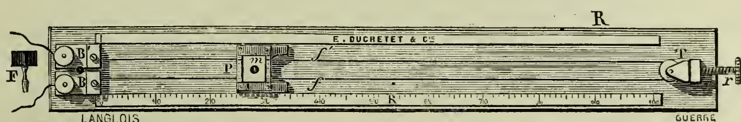


Fig. 198. — Réocorde. (*Ducretet.*)

d'un petit tube en verre plein de mercure et fermé par deux bouchons que traversent les fils : deux bornes B,B' situées aux extrémités d'un même côté de ces fils permettent de les introduire dans le circuit. Le courant entre alors par l'une de ces bornes, suit le fil correspondant jusqu'au curseur, traverse celui-ci, et revient par l'autre fil pour sortir par la seconde borne. La résistance du tube de mercure étant absolument négligeable, la résistance introduite par le rhéocorde est mesurée par une longueur de fil égale au double de la distance qui sépare la borne du curseur : cette distance se lit sur une règle divisée.

On se sert du rhéocorde dans la mesure des résistances pour compléter les évaluations des boîtes de résistance; on peut employer la disposition suivante (fig. 199) dans laquelle on reconnait immédiatement les éléments du pont de Wheatstone. En A et B sont les résistances accessoires λ_2 et λ_3; en D on intercale la résistance inconnue λ_1 et en C on place à la suite une caisse de résistance et un rhéocorde; on obtient l'équilibre à 1 ohm près par les bobines et on complète pour les fractions à l'aide du rhéocorde.

Le rhéocorde peut être employé aussi pour déterminer rapidement le rapport de deux résistances B et C; on les intercale dans un circuit comprenant, outre des pièces de grande section et de résistance négligeable, un fil fin TT′ le long duquel glisse un curseur *d* devant une règle divisée. En deux points *a* et *b* aboutissent des fils

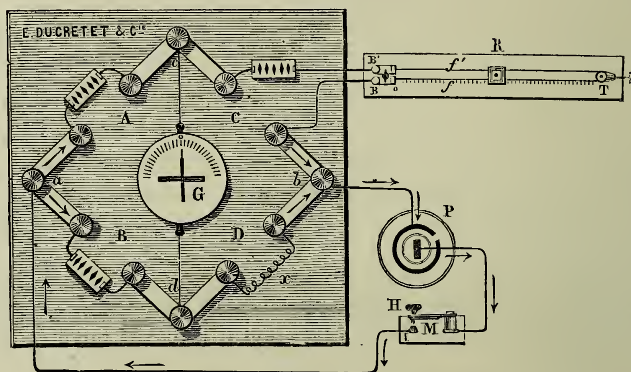


Fig. 199. — Pont de Wheatstone. (*Ducretet.*)

venant des pôles d'une pile P tandis qu'un galvanomètre G est relié d'une part en *c*, milieu de l'appareil, et de l'autre au curseur mobile *d*.

On reconnait aisément les éléments du pont de Wheatstone et

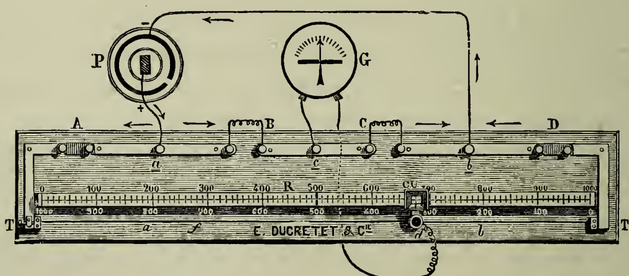


Fig. 200. — Pont de Wheatstone à rhéocorde. (*Ducretet.*)

l'on voit que le galvanomètre sera ramené au zéro lorsque les résistances B et C seront dans le rapport des résistances T*d* et T′*d*, rapport qui est donné par celui des longueurs des deux segments du fil.

288. Rhéostat de Wheatstone. Méthode de substitution pour

LA MESURE DES RÉSISTANCES. — Cet appareil est formé de deux cylindres à axes parallèles et reliés par des roues d'engrenage, de telle sorte que le mouvement de rotation communiqué à l'un par une manivelle M soit transmis à l'autre identiquement. L'un des cylindres A est en laiton et, par son axe et son support, est en communication avec la borne *a* : l'introduction de ce cylindre dans un circuit ne produit aucun effet appréciable, sa résistance est négligeable.

Le second cylindre B est en matière isolante, en buis ou en ébonite : il est creusé d'une gorge héliçoïdale dans toute sa longueur et le diamètre du cylindre qui représente le fond de cette rainure est rigoureusement égal au diamètre du cylindre A. Un fil de laiton ou mieux de maillechort est fixé à une extrémité du cylindre qui

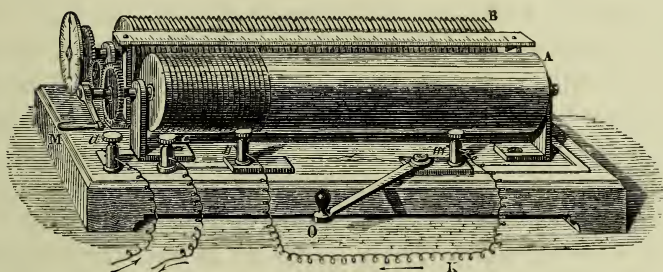


Fig. 21. — Rhéostat. (*Ducretet.*)

est terminé par une base métallique; celle-ci communique par son support avec un large conducteur de résistance négligeable qui aboutit à la borne *c* : nous supposons ici que la manette O est tournée de manière à venir s'appliquer sur le contact *n*.

Le fil s'enroule dans la rainure en la suivant dans toute sa longueur et, parvenu à l'extrémité opposée, quitte tangentiellement ce cylindre pour venir s'attacher sur le cylindre A. Si l'appareil fait alors partie d'un circuit, le courant entrant en *a* suivra le fil dans toute sa longueur pour venir sortir en *c*. Mais si l'on vient alors à agir sur la manivelle et à la faire tourner dans un sens convenable, une partie du fil quittera le cylindre B pour s'enrouler sur le cylindre métallique A qu'il touchera en tous les points. Le courant entrant en *a* pour sortir en *c* ne suivra pas cette partie de fil dont la résistance sera annulée et, passant directement à travers le cylindre, arrivera au point où le fil se détache tangentiellement du cylindre; c'est de ce point seulement que commence la longueur de fil traversée par le courant; cette partie est toujours égale à la longueur

qui reste enroulée sur le cylindre isolant. On connaît évidemment cette longueur, si l'on sait quel est le nombre de tours et la circonférence de l'un d'eux : celle-ci est donnée à l'avance pour chaque instrument. On sait le nombre de tours parce qu'une règle placée parallèlement aux cylindres est divisée en parties dont la longueur est égale au pas de la vis : la position du fil par rapport à cette règle donnera donc le nombre de tours et, par suite, la longueur. Un cadran divisé situé à l'une des extrémités et devant lequel se meut une aiguille liée au cylindre sert à évaluer les fractions de tour, ce qui permet d'atteindre une plus grande précision.

Bien que cet appareil puisse servir au pont de Wheatstone, il est plus souvent utilisé pour mesurer une résistance *par substitution,* méthode moins exacte, mais qui peut être un peu plus rapide.

La résistance à mesurer K est alors intercalée entre les bornes *m* et *n* et la manette est écartée comme l'indique la figure; le fil est enroulé entièrement ou à peu près sur le cylindre métallique et l'appareil est introduit dans un circuit qui contient une pile et un galvanomètre : l'aiguille de celui-ci est déviée d'un certain angle que l'on note. On pousse la manette O contre le contact *n* ; on supprime ainsi la résistance K, le courant subit un accroissement. On tourne alors la manivelle M, une partie du fil passe sur le cylindre isolant, la résistance s'accroît; on continue jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre soit ramenée à la position primitive : la résistance ainsi introduite est égale à la résistance cherchée K.

289. Mesure de la résistance dans le cas de forts courants. — Si le conducteur dont on cherche la résistance est traversé par un courant intense, il s'échauffe, comme nous le savons : sa résistance diminue alors. Il peut être intéressant de la chercher dans ces conditions mêmes, et non à l'aide de faibles courants qui ne produisent pas un échauffement sensible.

On peut toujours employer le pont de Wheatstone; seulement on prend pour λ_3 une résistance très grande par rapport à λ_2, ce qui entraîne que λ_4 sera très grand par rapport à λ_1. Il résulte de là que le courant parvenant en A se divisera : la presque totalité passera en ACB et, par suite, le conducteur H sera à peu près dans les conditions ordinaires de la pratique.

D'autre part, un courant très faible passera en ADB et traversera la boîte de résistance, ce qui est un avantage, car si elle était traversée par un courant intense, les fils s'échaufferaient, d'une part : ils n'auraient plus la résistance marquée et il faudrait faire des corrections qui ne sont pas rigoureuses; et, d'autre part, il y a à

craindre que l'échauffement, s'il est exagéré, ne fasse fondre les matières isolantes ou même ne détruise les fils.

290. Influence de la température sur les résistances. — Les valeurs des résistances des diverses substances ne sont pas absolument invariables ; elles sont modifiées, quelquefois d'une manière considérable, par la présence de substances étrangères, même en très petites proportions ; des variations dans la constitution physique, l'écrouissage, le recuit peuvent également amener des différences. Mais, de plus, il suffit de modifications dans la température pour changer la résistance et si, comme première approximation, on peut négliger ces modifications quand la température varie peu, il n'en peut plus être ainsi pour de notables différences de température, car alors la résistance peut varier dans le rapport de 2 à 1.

La dilatation, en modifiant les dimensions des conducteurs, n'a sur la conductibilité qu'une influence négligeable, ainsi qu'il serait facile de s'en assurer, à cause de sa faible valeur.

Les recherches qui ont été faites à ce sujet n'ont conduit à la découverte d'aucune loi précise. M. Becquerel a indiqué que, jusqu'à 100 degrés, on peut prendre la formule

$$R_t = R_0 (1 + at)$$

dans laquelle R_0 et R_t sont les résistances à 0° et à t°, et a une constante. Cette formule n'est qu'une forme abrégée de celle qui a été indiquée par M. Matthiessen qui signale la forme suivante comme représentant les résultats de ses expériences :

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2).$$

Enfin, M. C. W. Siemens considère comme applicable à tous les cas la formule suivante

$$R_t = A + BT^{\frac{1}{2}} + CT$$

dans laquelle T représente la température *absolue*, c'est-à-dire est égale à $273 + t$, t étant la température effective de l'expérience.

Nous donnons plus loin quelques valeurs numériques relatives à cette question.

291. Variations de la résistance du sélénium. — Le sélénium présente des effets très particuliers qui permettront, peut-être, de l'appliquer dans diverses circonstances, en mettant à profit les modifications que sa conductibilité subit de la part de la lumière alors

qu'il est à l'état cristallin, ainsi que l'a découvert M. W. Smith. La résistance qui augmente par l'action de l'élévation de température diminue sous l'influence de radiations plus réfrangibles que le rouge. Voici, d'après M. le lieutenant Sale, la valeur de la résistance d'un barreau de sélénium placé dans diverses conditions :

Dans l'obscurité..	330.000	Dans l'orangé..........	277.000
— le violet....	279.000	— le rouge..........	255.700
— le bleu.....	279.000	— la lumière diffuse..	270.000
— le vert.....	278.000	— un faisceau solaire.	165.000

Cette propriété du sélénium a été appliquée dans quelques circonstances, notamment dans le photophone, les expériences de radiophonie, le bolomètre, etc.

292. Résistance des corps en contact. — Lorsque deux corps solides sont en contact, les résultats sont sensiblement différents suivant les circonstances. Si les surfaces sont parfaitement décapées, si elles sont polies et si elles sont pressées l'une contre l'autre avec une certaine force, la conductibilité sera la même que s'il y avait continuité; mais la résistance serait considérablement augmentée si l'une de ces conditions n'était pas remplie : aussi, dans toutes les expériences sur les courants électriques, surtout dans les expériences qui se rapportent à des mesures, faut-il prendre grand soin que les contacts soient en bon état ; si la pile est un peu faible, il suffit d'un fil mal décapé ou non serré dans une borne pour que le courant ne puisse se manifester.

Lorsqu'il s'agit de substances qui ne sont pas susceptibles de s'altérer à l'air, il ne faut pas moins tenir compte de la pression exercée par les divers fragments les uns sur les autres, comme aussi de l'étendue des surfaces en contact. Le fait est très net avec du charbon : si dans un circuit on place trois baguettes de charbon dont une soit seulement posée sur les deux autres, il suffira du moindre mouvement communiqué à l'ensemble pour faire varier les contacts, ce qui amènera un changement dans la résistance et par suite dans l'intensité du courant. Le fait peut être mis en évidence en plaçant un galvanomètre dans le circuit : mais l'action, qui est manifeste même lorsque de petites vibrations sont communiquées à l'appareil, peut ne pas être facile à observer ainsi. L'emploi du *téléphone* permet, au contraire, d'apprécier les plus petites différences, comme nous le dirons par la suite ; c'est sur ce principe qu'est basé le microphone dont l'emploi se généralise maintenant dans un grand nombre d'applications.

293. Conductibilité des liquides et des gaz. — L'état liquide n'est pas une condition incompatible avec le passage d'un courant électrique : le mercure à la température ordinaire, les métaux en fusion tels que le potassium, le sodium sont des corps conducteurs, dont la conductibilité est de l'ordre de grandeur de celle des métaux solides. Mais s'il s'agit de liquides qui soient des corps composés, la question n'est pas la même : les uns ne se laissent absolument pas traverser par les courants, comme le pétrole, l'essence de térébenthine, etc. ; mais il en est d'autres qui se laissent traverser par le courant, bien que faiblement, et qui en même temps sont décomposés : c'est ce qui se présente pour les dissolutions salines, les acides dilués. Comme nous l'avons dit (126), la présence de l'eau n'est pas nécessaire et certains sels rendus liquides par fusion ignée se comportent comme les dissolutions. Que se passe-t-il dans ce cas? le courant ne traverse-t-il qu'en produisant l'électrolyse? ou bien, en même temps qu'une partie du courant agit ainsi chimiquement, n'y en aurait-il pas une autre partie, minime en tout cas, qui traverserait le liquide par simple conductibilité, physiquement pour ainsi dire?

La résistance opposée par les gaz au passage du courant électrique est encore plus grande que celle des liquides : ils peuvent être considérés comme absolument isolants, excepté lorsqu'ils sont extrêmement raréfiés.

294. Conductibilité des substances organisées. — La résistance des substances organisées est généralement très grande et quelques-unes mêmes peuvent être considérées comme absolument isolantes. Il est, dans tous les cas, difficile de prendre des mesures avec quelque précision, parce que les moindres changements amènent des différences notables.

La question présente un certain intérêt, par exemple au point de vue des applications médicales et chirurgicales. La résistance du corps humain au passage de l'électricité est un des éléments qui déterminent l'intensité des courants qui pourront traverser l'organisme sous l'influence d'une pile donnée. Sa valeur est très grande et doit se compter par plusieurs milliers d'ohms; mais il est bien difficile de préciser. Il existe d'ailleurs un élément capital, c'est la résistance offerte par la peau, résistance qui peut varier *énormément* suivant que la peau est sèche ou humide, qu'elle est recouverte d'eau pure ou d'un liquide légèrement acidulé, suivant qu'elle est ou non enduite de matière grasse, etc.

295. Mesure de la résistance d'un galvanomètre. — Lorsque

l'on possède deux galvanomètres et que l'on veut déterminer la résistance de l'un d'eux, on opère par la méthode générale du pont de Wheatstone : le galvanomètre en expérience, dont on a retiré l'aiguille pour éviter qu'elle ne subisse des changements d'aimantation, est placé dans la branche AC (fig. 195) comme on fait pour un conducteur quelconque; l'autre galvanomètre est placé dans la diagonale.

Mais si l'on n'a à sa disposition que le galvanomètre dont on cherche la résistance, cette méthode n'est plus applicable et il faut agir autrement : plusieurs procédés peuvent alors être employés.

Par exemple, on place le galvanomètre dans un circuit de résistance totale connue R (sauf, bien entendu, la résistance du galvanomètre γ), et l'on établit un shunt de résistance s qui amène une certaine déviation de l'aiguille aimantée. On change le shunt et on le remplace par un autre s', la déviation est aussitôt modifiée; mais on change la résistance extérieure, et on lui donne une valeur R' telle que la déviation de l'aiguille soit la même que précédemment, que, par conséquent, le courant qui traverse le galvanomètre ait repris la même intensité. Ces données permettent de calculer la résistance cherchée, que l'on trouve par la formule[1] :

$$\gamma = \frac{(R' - R)ss'}{Rs' - R's}.$$

296. — Il existe une autre solution de la même question qui repose sur l'emploi du pont de Wheatstone et qui est fort élégante (Sir William Thomson). Si nous considérons un pont de Wheatstone alors que la condition

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_4} = \frac{\lambda_2}{\lambda_3}$$

1. On sait, en effet, que le courant qui traverse le galvanomètre est donné, dans le cas d'un shunt, par la formule :

$$i = \frac{Es}{R\gamma + Rs + \gamma s}$$

formule générale des dérivations.

Si l'on a changé R et s en R' et s', de manière que i soit resté le même, on a :

$$i = \frac{Es'}{R'\gamma + R's' + \gamma s'}.$$

En égalant les valeurs de i, E disparaît et il vient en résolvant :

$$\gamma = \frac{(R' - R)ss'}{Rs' - R's}.$$

est remplie, aucun courant ne passe dans la diagonale CD. Il résulte de là que quelle que soit la résistance que l'on introduira dans cette diagonale, puisqu'elle n'est pas traversée par le courant, elle ne changera rien aux conditions des courants qui passent dans les branches ACB et ADB.

Concevons donc un pont de Wheatstone dont nous donnons seulement la figure schématique : plaçons le galvanomètre dans une quelconque des branches, AC par exemple, et disposons dans la diagonale CD une résistance notable que nous puissions à volonté introduire dans le circuit ou non. Le courant passant, l'aiguille du

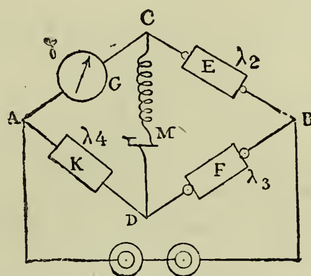


Fig. 202.

galvanomètre sera déviée d'une certaine quantité; établissons le contact en M : en général, le courant dans le galvanomètre changera, la déviation variera. On changera alors la résistance de λ_4 jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre ne subisse aucune modification, que le circuit soit fermé ou non. Lorsque cette condition sera remplie, on aura

$$\frac{\gamma}{\lambda_4} = \frac{\lambda_2}{\lambda_3}.$$

297. Mesure de la résistance d'une pile. — La méthode du pont de Wheatstone ne peut pas être ici employée directement, car l'introduction de la pile dans l'une des branches modifierait, par l'existence de sa force électromotrice, les résultats sur lesquels nous nous sommes précédemment appuyés. Mais on peut arriver au résultat par diverses méthodes.

Supposons d'abord que l'on puisse placer dans le circuit I un appareil (boussole des tangentes, galvanomètre gradué) qui permette d'évaluer le rapport des intensités de deux courants et dont on connaisse la résistance γ ainsi que la résistance du reste du circuit R moins la pile. On note l'intensité I du courant : si E est la force

électro-motrice de la pile (qu'il est inutile de connaître) et π la résistance inconnue de cette pile, on a

$$I = \frac{E}{R + \gamma + \pi}.$$

On introduit alors une résistance auxiliaire dans le même circuit et on fait varier sa valeur jusqu'à ce que l'intensité soit réduite à moitié. Soit ρ la résistance ainsi introduite, on a de même :

$$\frac{I}{2} = \frac{E}{R + \gamma + \pi + \rho},$$

ce qui exige évidemment

$$R + \gamma + \pi + \rho = 2(R + \gamma + \pi);$$

donc

$$\pi = \rho - (R + \gamma) \qquad (1)$$

Méthode de Mance. — On peut déterminer la résistance intérieure d'une pile par une expérience entièrement analogue à celle que nous avons indiquée pour la mesure de la résistance d'un galvanomètre (296).

On substitue la pile au galvanomètre et réciproquement : on démontre que dans ce cas, si les indications du galvanomètre sont les mêmes, que le circuit soit ouvert ou fermé en M, c'est que l'on a la même relation que pour le galvanomètre, soit, en appelant π la résistance de la pile

$$\frac{\pi}{\lambda_4} = \frac{\lambda_2}{\lambda_3},$$

d'où l'on déduira π.

Méthode de Thomson. — On place dans un circuit la pile de résistance inconnue π et un galvanomètre dont la résistance est γ, et l'on shunte à l'aide d'un fil dont la résistance est s et choisi de telle sorte qu'il donne dans le galvanomètre une déviation convenable. On a alors pour l'intensité du courant dans le galvanomètre (121, note)

$$I = \frac{Es}{\pi(\gamma + R) + \pi s + (\gamma + R)s}.$$

On enlève le shunt, le courant augmente d'intensité, mais on introduit dans le circuit une résistance auxiliaire ρ tellement choisie que la déviation du galvanomètre reprenne sa valeur primitive. On a alors

$$I = \frac{E}{\pi + R + \gamma + \rho}$$

On déduit de là :

$$\pi(\gamma + R) + \pi s + (\gamma + R)s = s\,[\pi + R + \gamma + \rho],$$

ce qui donne pour la valeur cherchée[1] :

$$\pi = \frac{\rho s}{\gamma + R}. \qquad (2)$$

298. Mesure simultanée de la résistance et de la force électromotrice d'une pile. — Wheatstone a indiqué une méthode dérivée de celle de Poggendorf qui permet non seulement de calculer E' sans connaître π', mais encore de calculer cette dernière valeur.

L'expérience étant disposée comme ci-dessus, on introduit dans le circuit de P' une résistance connue r et l'on détermine la valeur de ρ qui ramène le galvanomètre au zéro. L'équation (269) est applicable à la condition de remplacer π' par $\pi'+r$, et l'on a :

$$\frac{E}{E'} = \frac{\rho}{\pi' + r + \rho}.$$

On recommence la même opération en changeant la résistance r en r_1 : le galvanomètre est dévié et, pour le ramener au zéro, il faut changer aussi la résistance en B; soit alors ρ_1 sa valeur. On a encore :

$$\frac{E}{E'} = \frac{\rho_1}{\pi' + r_1 + \rho_1}.$$

En résolvant ces deux équations par rapport à $\frac{E'}{E}$ et à π, on a :

$$\frac{E'}{E} = \frac{(r_1 - r) + (\rho_1 - \rho)}{\rho_1 - \rho}$$

et

$$\pi' = \frac{\rho r_1 - \rho_1 r}{\rho_1 - \rho}.$$

1. Quelquefois on introduit dans les formules précédentes, non la résistance qu'il a fallu ajouter ρ, mais la valeur totale de la résistance R_1 dans la deuxième partie de l'expérience.

On a donc

$$R_1 = R + \rho.$$

Si on élimine ρ dans les équations (1) et (2), elles deviennent :

$$\pi = R_1 - (2R + \gamma) \qquad (1 \text{ bis})$$

$$\pi = \frac{(R_1 - R)s}{\gamma + R}. \qquad (2 \text{ bis})$$

CHAPITRE IV

ÉVALUATION DES GRANDEURS MAGNÉTIQUES ET ÉLECTRIQUES EN UNITÉS ABSOLUES

299. Des mesures magnétiques en unités absolues. — Nous avons indiqué précédemment comment on peut mesurer les quantités qui se rapportent au magnétisme seul en unités absolues. Il importe de remarquer que la possibilité de mesurer une grandeur quelconque en unités absolues permet de fixer la grandeur de cette unité absolue, ou, plus exactement, permet de mesurer une grandeur de même nature également en unités absolues.

Soit par exemple H l'intensité, évaluée en unités absolues, du champ magnétique terrestre en un point déterminé et à un instant déterminé, et soit à chercher l'intensité H′ en unités absolues d'un autre champ magnétique quelconque. Il suffira, par exemple, de faire osciller une même aiguille dans ces deux champs magnétiques en les plaçant dans des conditions identiques; si t et t' sont les durées des oscillations, on devra avoir nécessairement :

$$t = \pi \sqrt{\frac{I}{\mu H}} \qquad t' = \pi \sqrt{\frac{I}{\mu H'}}$$

D'où l'on tirera :

$$H' = H \frac{t^2}{t'^2}.$$

Il n'est donc pas nécessaire, pour évaluer une grandeur en unités absolues, d'avoir un étalon de l'unité absolue correspondante : il suffit de connaître la valeur mesurée avec la même unité d'une grandeu de même nature.

En fait, il n'existe pas d'étalon pour le magnétisme : on n'a pas établi un champ magnétique d'intensité 1, pas plus que l'on n'a un pôle magnétique égal à l'unité. On peut cependant faire toutes les mesures absolues nécessaires, parce que l'on peut déterminer expérimentalement (228), nous le répétons, la valeur en unités absolues du champ magnétique terrestre et celle du moment magnétique d'un barreau donné.

300. Des mesures électrostatiques en unités absolues. — L'évaluation de l'unité électrostatique donnerait lieu aux mêmes remarques générales que les unités magnétiques dont nous venons de parler : il est inutile de construire, de posséder un étalon représentant l'unité électrostatique, il suffit de pouvoir mesurer en unités absolues la valeur d'une quantité électrostatique quelconque.

Remarquons d'ailleurs qu'il serait irréalisable de chercher à construire un étalon électrostatique : l'état d'un corps électrisé varie facilement avec les conditions extérieures, et on ne pourrait conserver sur un corps donné et d'une manière indéfinie une quantité fixe d'électricité.

Il est plus facile de comparer, non les quantités d'électricité, mais les potentiels, et l'on peut obtenir un étalon dans lequel on puisse mesurer effectivement une différence de potentiel en la comparant à des unités mécaniques, à des poids. On y arrive notamment avec l'électromètre absolu de Sir William Thomson, par exemple.

La capacité d'un conducteur dépend seulement de sa forme et de sa grandeur et est donnée par des formules pour un certain nombre de cas : par exemple, une sphère de rayon 1 a une capacité égale à l'unité. Par des comparaisons expérimentales, on pourra trouver la capacité d'un conducteur quelconque : s'il est chargé, et que l'on mesure son potentiel en unités absolues, la *quantité*, mesurée aussi en unités absolues est donnée par l'équation $Q = CE$.

Il résulte de là que l'étude des grandeurs qui se rattachent à l'électricité statique dépend, comme mesure absolue, de la détermination d'un potentiel en unités absolues. Nous traitons cette question ci-après.

301. Des mesures électromagnétiques en unités absolues. — Nous avons dit (214) que, des deux systèmes électrodynamiques et électromagnétiques, qui ont entre eux de grandes affinités, on avait choisi le dernier pour les mesures qui se rattachent aux courants ; nous ne nous occuperons donc que de celui-ci.

Nous n'avons pas besoin de répéter ce que nous avons dit, qu'il

n'est pas indispensable d'avoir des étalons représentant les unités adoptées et qu'il suffit de connaître exactement la valeur, en unités absolues, d'une grandeur bien déterminée.

Il n'y a évidemment pas à construire un étalon de courant, le courant ne correspondant pas à une donnée simple, matériellement représentable, et l'on ne peut obtenir une représentation matérielle d'un courant de 1 ampère ou même d'une valeur fixe d'ampères.

On peut déterminer matériellement, par contre, la valeur de 1 ohm, unité de résistance, et l'on peut également construire un étalon représentant l'unité de capacité ou au moins ayant avec cette unité un rapport connu. Pour ces grandeurs, il sera donc possible d'effectuer directement des mesures.

Il n'est pas impossible de construire matériellement un appareil ayant une force électromotrice égale à l'unité produisant une variation de potentiel égale à 1. On ne l'a pas cherché cependant, et l'on se borne à avoir un étalon dont la valeur en volts est parfaitement connue.

Nous avons indiqué comment on peut comparer entre elles des quantités de même nature; pour que cette comparaison conduise à des mesures absolues, il faut que l'on ait des appareils étalonnés. Comment peut-on arriver à cet étalonnage en unités absolues ? C'est ce que nous allons indiquer pour le système électromagnétique.

302. Fixation des étalons électromagnétiques. — L'unité de résistance est l'élément le plus simple à déterminer, parce que l'évaluation absolue d'une résistance peut se faire indépendamment de la connaissance de la mesure de toute grandeur électrique ou magnétique, et peut s'obtenir à l'aide de la connaissance des dimensions de l'appareil même et des données résultant de l'expérience : une vitesse de rotation (nombre de tours par seconde) et une déviation angulaire.

Cette méthode (305) n'est pas exempte d'objections et l'on en a proposé d'autres : jusqu'à présent c'est elle qui a servi à déterminer la valeur de l'ohm, à construire un étalon représentant cette unité par conséquent.

L'intensité d'un courant peut se déterminer à l'aide de l'électrodynamomètre ou à l'aide de la balance électrodynamique plus ou moins modifiée. Les attractions ou les répulsions qui se produisent alors, évaluées en unités mécaniques absolues, donnent aussi la valeur de l'intensité en unités absolues. On peut arriver à faire cette mesure, moins directement, mais plus commodément comme nous le dirons. Mais les résultats s'appliquent à un courant déterminé

dans un circuit donné, et l'on ne peut être sûr de reproduire identiquement les mêmes conditions, de telle sorte que l'on ne saurait établir rien qui ressemble à un étalon dans ce cas.

La quantité d'électricité ne peut non plus se représenter matériellement, mais elle est déterminée par l'équation $Q = It$, si l'on a mesuré l'intensité et le temps. Si le courant n'est pas constant, il faut prendre la valeur moyenne ou opérer par des quadratures. Mais on peut évaluer la quantité même par les actions chimiques auxquelles elle donne naissance : il faut seulement déterminer une fois pour toutes la relation qui existe entre la quantité d'électricité qui a traversé un électrolyte et le poids du corps décomposé, ce qui a été fait (266).

Quant à la force électromotrice, elle ne se mesure pas directement en unités électromagnétiques, mais elle se déduit d'une observation dans laquelle on mesure l'intensité I du courant et la valeur de la résistance totale R : si ces deux grandeurs sont mesurées en unités absolues, la force électromotrice, aussi mesurée en unités absolues, est donnée par la formule :

$$E = IR.$$

On comprend également que les données précédentes permettent de déterminer la valeur absolue C d'une capacité; il suffira de mesurer, également en valeurs absolues, la quantité d'électricité Q qu'on y aura introduite et la variation de potentiel E qui en résulte. On a alors, en effet :

$$C = \frac{Q}{E}.$$

303. Mesure absolue des différences de potentiel. — La valeur absolue de la force électromotrice, dans le système électrostatique d'unités, peut être déterminée à l'aide de l'électromètre absolu de Sir William Thomson.

Le principe de la méthode consiste à produire l'attraction d'un plateau mobile par un plateau fixe, placé parallèlement et électrisé contrairement, et à mesurer la force qui se manifeste alors. Dans l'appareil que Snow Harris a construit sur ce principe, le plateau mobile était fixé au fléau d'une balance et l'on mesurait l'attraction par des poids placés dans l'autre plateau. Mais la formule que l'on emploie ne donne des résultats simples que si le plateau est uniformément électrisé; c'est ce qui n'arrive pas, car on sait (59) que l'électrisation augmente notablement sur les bords d'un plateau circulaire électrisé.

Sir William Thomson obvia à cet inconvénient par l'emploi d'un *anneau de garde*. Le plateau mobile est placé dans une ouverture circulaire qu'il remplit presque exactement et qui est pratiquée dans un disque annulaire fixe d'un plus grand diamètre avec lequel il communique métalliquement. Lorsque le disque mobile est dans le plan du disque annulaire qui est l'anneau de garde, ces deux pièces se comportent comme ne faisant qu'un seul plan dont le disque serait la partie centrale. C'est donc sur l'anneau de garde seul que la distribution de la charge est variée et, sur le disque, elle est uniforme.

Le disque est suspendu à un ressort qui peut être tendu plus ou

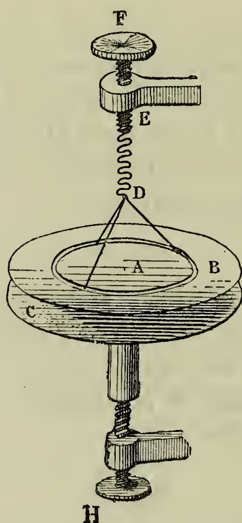


Fig. 203.

moins; on a mesuré à l'avance la force correspondante à chacun des degrés de tension. (Dans les modèles primitifs, le disque était suspendu à un fléau et équilibré par un contre-poids).

Parallèlement à l'anneau de garde et à une petite distance se trouve un disque métallique dont le diamètre est égal au diamètre extérieur de l'anneau de garde : il est fixé à une vis micrométrique qui permet de l'élever ou de l'abaisser parallèlement à lui-même.

L'anneau de garde et le disque mobile sont maintenus à un potentiél constant; on s'assure que cette condition est remplie à l'aide d'une *jauge* spéciale que nous décrirons plus loin, et on reproduit la charge, si elle vient à changer, à l'aide du *replenisher* (rechargeur).

Le plateau inférieur peut être mis en communication avec les corps qu'il s'agit d'étudier, ou plus exactement on le met successivement en communication avec les deux corps dont on veut déterminer la différence de potentiel. Voici comment on opère.

Le plateau C est amené au potentiel 0 ainsi que le disque et l'anneau de garde en les mettant en communication avec la terre ; on amène alors le disque un peu au dessus de l'anneau de garde, et on mesure cette distance. On sait donc quelle sera la tension du ressort quand le disque sera ramené dans le plan de l'anneau de garde, et par suite quelle est la force correspondante f. Le disque et l'anneau de garde sont amenés à un état électrique invariable, comme nous l'avons dit : on met alors le plateau C en communication successivement avec les deux corps dont les potentiels sont V_1 et V_2 et, chaque fois, on ramène le disque dans le plan de l'anneau de garde, ce qui tend le ressort de la même quantité dans les deux cas. Pour arriver à ce résultat, il a fallu déplacer plus ou moins le plateau C à l'aide de la vis micrométrique ; si on a mesuré le déplacement pour passer d'une position à l'autre, on a la formule :

$$V_1 - V_2 = d\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}$$

dans laquelle π est le rapport de la circonférence au diamètre et S la surface du disque mobile.

Si d et S sont mesurées en centimètres carrés et F en unités de force (dyne), la valeur $V_1 - V_2$ sera donnée en unités absolues [1].

304. — Divers détails doivent être indiqués pour faire comprendre le fonctionnement de cet important appareil.

1. Si V est le potentiel constant du disque et de l'anneau de garde et si le corps de potentiel V_1 est mis en communication avec le plateau C, on démontre que l'on a la relation suivante, au moment de l'équilibre :

$$V - V_1 = D_1\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}$$

si D_1 est la distance qui sépare les deux plans. Dans l'autre position d'équilibre, la force F restant la même, on a aussi :

$$V - V_2 = D_2\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

D'où, en retranchant et remarquant que $D_2 - D_1 = d$ est le déplacement du plateau C, il vient enfin :

$$V_1 - V_2 = d\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

Le disque mobile très léger, en aluminium, est suspendu non à un ressort à boudin, mais à trois ressorts de forme analogue aux ressorts de voiture et très doux. Pour l'amener constamment à une position invariable, on emploie un dispositif que l'on rencontre assez fréquemment : ce disque porte, à l'aide d'une tige bifurquée, un cheveu tendu qui se déplace devant une pièce verticale fixe sur laquelle sont tracés deux points noirs très voisins ; le disque est à la position qu'il doit occuper quand le cheveu est exactement entre les deux points. Une lentille placée devant ce système et fonctionnant comme loupe permet de s'assurer aisément si cette condition est remplie.

La graduation du ressort est faite directement en chargeant le disque d'un poids connu et notant de combien il faut déplacer la vis micrométrique EF pour ramener le disque à sa position normale.

Pour maintenir l'anneau de garde et le disque A à un potentiel invariable, on les met en communication avec un condensateur. Ce

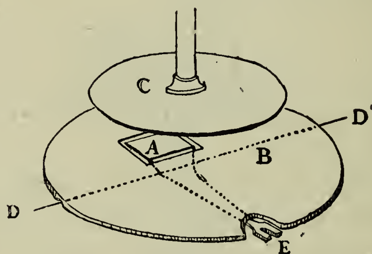


Fig. 204.

condensateur est formé par le tambour en verre même dans lequel est renfermé l'appareil et sur les deux faces duquel sont collées des feuilles d'étain ; on a pratiqué des ouvertures dans ces feuilles, de manière à permettre de voir les pièces situées à l'intérieur. Il faut pouvoir vérifier que ce condensateur reste chargé au même potentiel, et il faut pouvoir le ramener à ce potentiel s'il s'en était écarté.

Pour vérifier la constance, Sir William Thomson emploie ce qu'il nomme une *jauge* ou *électromètre idiostatique*; c'est un électromètre basé sur le même principe que l'électromètre absolu lui-même : une pièce métallique mobile dans une ouverture pratiquée dans une plaque de garde est mise en présence d'une lame parallèle ; l'attraction qui se produit lorsque les deux lames sont électrisées contrairement est fonction de leur distance. On l'équilibre par un

contrepoids : à cet effet, la pièce mobile porte un bras long et léger qui est fixé à un fil métallique tendu transversalement : la rotation se fait autour de ce fil qui, se trouvant légèrement tordu, par le fait même tend à ramener le fléau à sa position d'équilibre ; en outre, c'est par ce fil que le disque mobile reçoit une charge électrique. Ce disque mobile doit toujours être maintenu dans le plan de l'anneau de garde, ce dont on s'assure par le système *cheveu et points*, le cheveu étant fixé à l'extrémité du fléau qui fait contrepoids.

Dans chaque expérience, le cheveu doit être maintenu invariablement entre les points sans faire varier la distance du plateau attractif parallèle. S'il survient un déplacement du cheveu manifestant une variation dans la charge, on reproduit celle-ci à l'aide du rechargeur (replenisher) que nous décrirons plus loin, jusqu'à ce que le cheveu soit revenu entre les index.

La capacité du tambour condensateur dans lequel sont renfermés les divers organes que nous venons de décrire est absolument desséchée par de la pierre ponce imbibée d'acide sulfurique.

305. Mesure absolue d'une résistance. Détermination de l'Ohm. — Avant l'adoption des unités BA et des unités pratiques correspondantes, divers physiciens avaient fait usage d'étalons diversement définis : l'un des plus répandus pour la résistance était l'unité Siemens, résistance d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 1 mètre de longueur à la température de 0°.

Pour arriver à définir les unités BA expérimentalement, il ne pouvait être question que des unités pratiques, et il suffisait d'évaluer en *ohms* la résistance d'un conducteur parfaitement déterminé, par exemple d'un étalon représentant la valeur de l'unité Siemens.

Des méthodes diverses ont été proposées; nous décrirons seulement le procédé employé par la commission de la « British Association » et qui avait été indiqué par Sir William Thomson. Il consiste à faire tourner un conducteur circulaire autour d'un axe vertical : sous l'influence de l'action magnétique terrestre ce conducteur est traversé par un courant dont le sens est déterminé par la loi d'Ampère. Par rapport à des points fixes sur ce conducteur, le courant change de sens deux fois pour chaque révolution, à l'instant où le plan du conducteur passe dans le plan du méridien magnétique. Mais on peut se placer à un autre point de vue et dire que le courant a un sens qui reste invariable pour la partie du conducteur qui est à l'est du plan du méridien magnétique, de même

que dans la partie qui est à l'ouest le sens du courant reste aussi invariable et est inverse du précédent.

Si alors, au centre du conducteur mobile, on place une aiguille aimantée, celle-ci sera déviée et, par une vitesse de rotation déterminée, prendra une position fixe d'équilibre.

Il existe une relation entre le nombre de tours effectués par le conducteur en une seconde et la résistance : on peut concevoir que ni l'intensité du magnétisme terrestre, ni celle de l'aiguille n'interviennent, en remarquant que chacune de ces quantités entre deux fois et disparaît en prenant un rapport : l'intensité du magnétisme terrestre, d'une part, dans la valeur de la force directrice de l'aiguille et dans l'intensité du courant produit ; le magnétisme terrestre, d'autre part, dans la valeur de la force directrice de l'aiguille et dans la force exercée par le courant sur cette aiguille [1].

En réalité l'expérience présente des difficultés et il faut introduire de nombreuses corrections dans les calculs. D'autres méthodes ont été proposées; mais malgré la réunion d'une commission internationale spéciale (octobre 1882), on n'a pas encore décidé celle à laquelle il convient de s'arrêter pour obtenir la plus grande approximation. Il nous suffit donc d'avoir indiqué la possibilité d'effectuer la détermination de l'unité absolue de résistance.

306. Étalon de résistance. — Après avoir déterminé en valeur absolue la résistance des étalons qui avaient été employés auparavant, la « British Association » décida de construire un étalon représentant aussi exactement que possible la nouvelle unité adoptée, l'ohm. La commission chargée de ce travail chercha d'abord quelle devait être la substance employée : elle rejeta le mercure et décida que l'étalon serait constitué par une substance solide. Des expériences spéciales conduisirent à adopter le maillechort (argent

1. On démontre par le calcul que si L est la longueur du conducteur dont R représente la résistance, r le rayon du cercle autour duquel il est enroulé, V la vitesse de rotation, ml le moment magnétique de l'aiguille, H l'intensité du champ magnétique et δ la déviation de l'aiguille, le moment du couple qui agit sur l'aiguille est $\frac{L^2VH}{4r^2R}\, ml \cos \delta$. Le moment du couple dû à l'action du magnétisme terrestre sur la même aiguille sera $Hml \sin \delta$; à cause de l'équilibre, il doit y avoir égalité entre les moments de ces deux couples, on a donc :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{L^2V}{4r^2R}$$

équation d'où l'on déduit R lorsque l'on connaît les autres quantités : L et r sont des données relatives à l'appareil employé, V et δ sont des nombres résultant de l'expérience. On peut donc calculer R.

allemand) ou un alliage de 66 d'argent pour 33 de platine : ces alliages présentent entre autres avantages celui que leur conductibilité varie peu quand la température change.

Le fil, dont la longueur est déterminée avec soin, est recouvert de soie et enroulé en double spirale, comme nous l'avons expliqué pour les bobines de résistance ; ses extrémités sont soudées à deux tiges de cuivre de 7 millimètres de diamètre environ et doublement recourbées. Généralement le fil fin et la partie voisine des conducteurs de cuivre sont placés dans une boîte en métal mince, dans laquelle on coule de la parafine. L'appareil porte l'indication de la

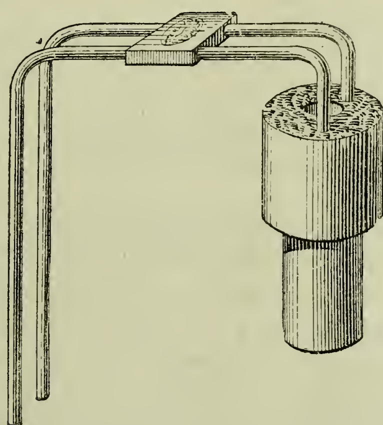


Fig. 205.

température à laquelle la bobine a exactement la valeur de 1 ohm : on peut l'amener facilement à cette température en la plongeant dans l'eau chaude ou tiède.

Contrairement aux décisions de l'Association britannique, le Congrès de Paris (1881) a décidé que l'étalon serait représenté par une colonne de mercure pur de 1 millimètre carré de section à la température de 0°. Des mesures doivent être faites ultérieurement pour déterminer la longueur de cette colonne qui représente l'ohm. On sait déjà, et cela suffit dans la pratique, que cette longueur est comprise entre $1^{m},04$ et $1^{m},05$ [1].

307. Mesure absolue de l'intensité d'un courant. — La mesure

1. L'ohm mesure à peu près la résistance d'un fil de cuivre pur de 1^{mm} de diamètre et de 48^{m} de longueur ; ou moins exactement celle d'un fil de fer télégraphique de 4^{mm} de diamètre et de 1 hectomètre de longueur.

de l'unité absolue de l'intensité d'un courant peut se faire par plusieurs méthodes : nous indiquerons les deux suivantes.

1° On peut se servir de la boussole des tangentes qui donne la valeur absolue de l'intensité du courant qui la traverse, lorque l'on connaît la valeur de la composante horizontale du magnétisme terrestre. Si I est l'intensité du courant, α la déviation, R le rayon du cercle sur lequel est enroulé le fil et L la longueur de celui-ci, on a [1] :

$$I = \operatorname{tg} \alpha . \frac{R^2 H}{L}.$$

2° On peut également se servir de l'électrodynamomètre ou de la balance électrodynamique.

L'électrodynamomètre doit être disposé de manière que le plan des spires de la bobine fixe soit parallèle au méridien magnétique : on agit alors sur les fils à la partie supérieure, de manière que le plan de la bobine mobile soit perpendiculaire au plan de la bobine fixe.

Lorsque le courant traversera les deux bobines, la bobine mobile tournera sans pouvoir arriver à devenir parallèle à la bobine fixe, parce que le couple résultant de la torsion du bifilaire agit en sens contraire de l'action attractive des bobines. On notera la déviation observée, d'où l'on pourra déduire la valeur absolue de l'intensité du courant si l'on connait les constantes de l'appareil.

En réalité, l'action n'est pas tout à fait aussi simple, parce que la

1. Nous avons donné (248) la formule générale :

$$hI = \varphi \operatorname{tg} \alpha$$

dans laquelle φ était la force exercée sur l'aiguille par la terre et hI celle exercée par le courant. Mais si nous avons H, valeur en unités absolues de la composante horizontale du magnétisme terrestre, et m, valeur du pôle, on aura immédiatement

$$\varphi = mH.$$

D'autre part, l'action du courant sur cette aiguille est donnée par l'expression

$$\frac{m.I.L}{R^2}.$$

On a donc :

$$\frac{mIL}{R^2} = mH \operatorname{tg} \alpha$$

Ce qui conduit à la formule ci-dessus.

bobine mobile est soumise à l'influence du magnétisme terrestre : mais cette influence est faible si la bobine mobile est primitivement perpendiculaire au plan du méridien et s'écarte peu de cette position et si, en outre, l'intensité du courant est peu considérable; de plus, on peut l'éliminer en faisant deux observations successives dans lesquelles on fera passer le même courant dans des sens opposés[1].

On peut également faire usage d'une balance électrodynamique et calculer à l'avance, en tenant compte des dispositions et des dimensions de l'appareil, la valeur de l'attraction ou de la répulsion qui doit se produire.

308. Détermination de l'unité absolue de quantité et de l'équivalent chimique de l'électricité. — Dans le système électromagnétique, les quantités d'électricité sont évaluées en fonction du courant auquel elles ont donné naissance : la valeur du *coulomb*, c'est celle de la quantité d'électricité qui a passé en une seconde dans un conducteur traversé par un courant d'une intensité de 1 ampère. La détermination de l'unité de quantité est donc la conséquence immédiate de celle de l'unité de courant.

Une donnée qui se rattache immédiatement à celle de la quantité,

1. L'action exercée sur la bobine fixe est

$$\frac{2\pi^2 l^2 N n I^2}{R}$$

et conserve cette valeur malgré la déviation parce que celle-ci est très minime.

Si la déviation est α, le couple qui tend à faire tourner la bobine est

$$\frac{2\pi^2 r^2 N n I^2}{R} \cos\alpha.$$

Le couple du bifilaire est A sin α (230, note). On a donc :

$$\frac{2\pi^2 r^2 N n I^2}{R} \cos\alpha = A \sin\alpha$$

d'où

$$I = \frac{1}{\pi r}\sqrt{\frac{RA \operatorname{tg}\alpha}{2Nn}}.$$

La quantité A, constante du bifilaire, s'obtient en faisant osciller la bobine non traversée par le courant, d'abord seule, puis chargée d'un corps dont le moment d'inertie soit connu. On opère d'une manière analogue à celle qui a été indiquée au n° 229.

On peut également déterminer cette constante par une expérience comparative directe, en plaçant dans le même circuit l'électrodynamomètre et une boussole des tangentes, et faisant passer un courant dont la boussole des tangentes permet de mesurer la valeur absolue.

c'est celle de l'action chimique que peut produire une quantité donnée d'électricité. La détermination de cette valeur peut s'effectuer pour un métal quelconque, car d'après les lois de Faraday, on sait que les poids de métal déposé sont proportionnels aux poids atomiques.

La recherche de cette valeur a été effectuée d'abord par Weber. Les dernières mesures sont dues à M. Mascart. L'opération est simple, en principe : on fait passer dans un électrolyte un courant constant dont on détermine l'intensité en unités absolues et l'on note le poids de métal déposé après un temps donné.

M. Mascart a employé comme action chimique le dépôt d'argent dans une dissolution d'azotate d'argent : l'intensité absolue du courant était déterminée à l'aide d'une sorte d'électrodynamomètre (ou plus exactement de balance électrodynamique) qui comprend deux larges bobines plates disposées horizontalement, et une longue bobine cylindrique suspendue à un plateau de balance ; la base inférieure de cette bobine se tient dans le plan de symétrie des deux premières. Le calcul donne assez simplement la relation entre la valeur de l'attraction et l'intensité absolue du courant. Les expériences duraient de 25 à 40 minutes.

M. Mascart a trouvé que le passage de 1 coulomb permet de dégager ou déposer $0^{mgr},010415$ d'hydrogène, $0^{mgr},33064$ de cuivre ou $1^{mgr},1247$ d'argent.

On déduit de là qu'il faut 96 coulombs (exactement 96,01) pour dégager 1 milligramme d'hydrogène, ou plus généralement pour électrolyser 1 équivalent d'un sel métallique exprimé en milligrammes.

309. Rapport des unités dans divers systèmes. — Nous avons dit que le rapport des mesures d'une même grandeur dans le système électrostatique et dans le système électromagnétique se trouvait être une vitesse.

Il n'est pas sans intérêt, pour pouvoir passer de l'un des systèmes à l'autre, de connaître la valeur de ce rapport. Sir William Thomson a cherché expérimentalement à faire cette détermination : il y est parvenu en mesurant une force électromotrice déterminée, d'abord en unités électrostatiques à l'aide de son électromètre absolu (303), puis en unités électromagnétiques ; pour y arriver, à l'aide de l'électrodynamomètre (261), il mesurait l'intensité absolue d'un courant passant dans un circuit dont la résistance était connue : le produit de ces deux quantités lui donnait la mesure cherchée ($E = IR$).

Il trouva comme valeur moyenne $282,5 \times 10^8$ unités absolues (centimètres) par seconde, soit 282 500 kilomètres par seconde.

Par d'autres méthodes, Clerck Maxwell trouva 288 000 kilomètres par seconde ; Weber et Kohlrausch avaient obtenu un nombre un peu plus considérable, 310 740.

De nouvelles recherches furent exécutées depuis et donnèrent les résultats suivants :

Mac Kichan..................	293 000	kilomètres par seconde.
Ayrton et Perry..............	298 000	—
Hockin......................	298 800	—

Il est fort intéressant de remarquer que ces valeurs se rapprochent beaucoup de celle de la vitesse de la lumière.

Il est probable qu'il y a là autre chose qu'une simple coïncidence, et ce fait serait en rapport avec certaines idées sur la nature de l'électricité, idées qui ne sont pas assez précises encore pour être développées ici.

310. Effets électromagnétiques produits par un corps électrisé en mouvement. — Clerck Maxwell avait annoncé que si un corps chargé statiquement pouvait se mouvoir matériellement avec la vitesse du courant électrique, il produirait les mêmes effets qu'un courant correspondant au passage de la même quantité d'électricité par seconde.

M. Rowland réalisa une expérience de ce genre ; bien que la vitesse communiquée au corps chargé d'électricité ne pût être égale à celle d'un courant, il obtint un effet appréciable et fit dévier un système placé dans le voisinage et soustrait à l'action terrestre.

De ces expériences, il a pu déduire une valeur du rapport des unités électriques : le nombre qu'il a obtenu, 304 480 kilomètres par seconde, est très voisin des valeurs trouvées directement.

CHAPITRE V

MACHINES ÉLECTRIQUES

311. Caractère des nouvelles machines électriques. — Bien que les machines électriques ne paraissent pas actuellement présenter un très grand intérêt pratique, car elles sont appliquées seulement en médecine dans quelques cas, il est nécessaire de faire connaître les modèles nouveaux, qui pour n'être pas classiques ne sont cependant pas moins intéressants.

Nous indiquerons d'abord une intéressante modification qui a été apportée à la machine de Holtz que nous avons déjà décrite (83), puis nous nous occuperons sommairement de quelques appareils moins connus.

Il y a deux données qui caractérisent une machine électrique déterminée : d'une part le moyen de produire une rupture d'équilibre électrique entre deux points, et de l'autre le moyen de ramener deux points différemment électrisés à l'état d'équilibre électrique.

Nous avons vu que les charges électriques sont développées par le frottement comme dans la machine de Ramsden, ou par influence comme dans la machine de Holtz. C'est ce dernier moyen qui est généralement employé dans les machines nouvelles; la raison en paraît simple. En réalité, dans tous les cas, on obtient comme effet total l'équivalent du travail mécanique dépensé à la manivelle de la machine (déduction faite des résistances passives résultant des frottements des axes, de la raideur des cordes, etc.). Or, dans les machines analogues à la machine Ramsden, le frottement détermine le dégagement d'une certaine quantité de chaleur, ce qui exige l'absorption d'une quantité correspondante d'énergie et diminue par conséquent l'effet électrique obtenu.

Au point de vue pratique, il ne suffit pas d'avoir obtenu une charge électrique, il faut encore qu'elle subsiste jusqu'au point où elle doit être utilisée. Que doit-il se produire dans les machines où les charges électriques sont développées, soit par frottement, soit par influence, sur un plateau de verre mobile ? Il est clair que les diverses parties de ce plateau, possédant des charges contraires, ne peuvent fonctionner que si le plateau est assez sec et assez propre pour n'être pas conducteur ; on peut arriver à un résultat analogue en localisant, pour ainsi dire, les diverses charges électriques, non sur différentes parties d'un plateau isolant, mais sur des pièces métalliques, des secteurs métalliques isolés.

D'autre part, les pointes, les peignes qui sont usités pour établir ou rétablir l'équilibre électrique peuvent être remplacés par des balais métalliques qui viendront toucher les secteurs métalliques sur des proéminences convenablement disposées, sans toucher au disque qui supporte les secteurs dans tout le reste de leur étendue. Quelquefois même, sans que nous puissions nous rendre compte de cette disposition, on emploie à la fois sur une même monture le peigne et le balai.

Dans les machines dont nous voulons parler nous trouverons ce double caractère, ce qui leur donne au fond une certaine ressemblance, et comme principe et comme mode de fonctionnement.

312. Machine de Holtz à conducteur diamétral. — Lorsque, dans la machine de Holtz (83), la distance explosive devient trop grande, ou dans quelques autres circonstances, il peut arriver que les charges disparaissent absolument ou même s'intervertissent. Il faut alors à nouveau amorcer et charger la machine, ce qui est un inconvénient réel. Pour l'éviter, M. Holtz a modifié le modèle que nous avons décrit par l'adjonction d'un conducteur diamétral.

Dans ce nouveau modèle, les armatures de papier occupent un espace beaucoup plus grand que précédemment et s'étendent sur un quadrant. De l'autre côté du plateau mobile, et montés sur un manchon isolant que traverse l'arbre de rotation, se trouvent deux peignes R, S analogues à ceux destinés à collecter l'électricité et qui sont reliés métalliquement l'un à l'autre. Ces peignes se trouvent aux extrémités d'un même diamètre et placés en face des armatures de papier vers l'extrémité qui ne porte pas la pointe.

Lorsque les conducteurs P′ et Q′ sont en communication, le conducteur ne produit à peu près aucun effet : s'il était seul, il agirait comme le font précisément les conducteurs P et Q; mais ceux-ci ayant produit l'effet d'influence, le conducteur diamétral ne joue

aucun rôle. Si, au contraire, les conducteurs P′ Q′ sont assez écartés pour que le flux d'électricité ne puisse passer de p à q, ce qui amènerait bientôt le plateau à l'état neutre, le conducteur diamétral intervient et remplit seul le rôle attribué précédemment à P Q, maintenant ainsi les charges accumulées sur les feuilles de papier.

L'écartement entre p et q lorsque la machine fonctionne n'est pas assez considérable pour empêcher le passage du flux d'électricité; mais il suffit qu'il existe pour que les peignes P et Q ne fonctionnent pas complètement comme nous l'avons d'abord supposé,

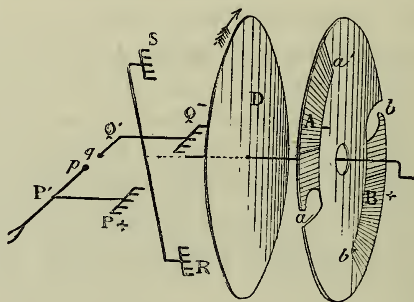


Fig. 206.

de telle sorte que le plateau de verre ne change pas complètement d'électrisation en passant devant eux; ce changement, nécessaire au bon fonctionnement de la machine est complété et assuré par le conducteur diamétral.

L'emploi du conducteur diamétral semble diminuer un peu la puissance de la machine ; mais l'avantage d'éviter le désamorcement est assez considérable pour que cette modification soit un réel perfectionnement.

313. Duplicateurs, reproducteurs de charges (replenishers). — Parmi les nouvelles machines, dont on trouverait la première idée dans le *duplicateur* de Bennet (1787), nous devons signaler les *reproducteurs de charges* (*replenishers*) qui sont employés dans quelques appareils.

Le replenisher que Sir William Thomson a employé dans son électromètre absolu permet d'accroître la charge sur des conducteurs déjà électrisés, de manière à maintenir entre eux une différence de potentiel déterminée à l'avance. Voici comment on peut le supposer construit théoriquement et comment on peut concevoir son mode de fonctionnement.

Il comprend deux armatures cylindriques A et B qui sont mises

en communication avec les conducteurs que l'on veut maintenir chargés : soit, par exemple, A chargé positivement et B chargé négativement. Des ressorts métalliques *a* et *b* sont fixés respectivement à l'intérieur de chacune de ces pièces avec lesquelles ils communiquent. Deux pièces α et β portant également des frotteurs à ressort et communiquant entre elles par un fil métallique sont placées dans des ouvertures pratiquées dans les cylindres précédents. Enfin deux armatures métalliques portées par des bras isolants tournent autour d'un axe qui se projette en O et chacune d'elles vient successivement toucher les quatre ressorts 1, 2, 3 et 4. Considérons seulement d'abord une de ces pièces et supposons qu'elle commence par venir en contact avec le ressort *a*.

Quel que soit l'état antérieur de cette pièce, elle sera ramenée à l'état neutre, car elle se trouve à l'intérieur d'un con-

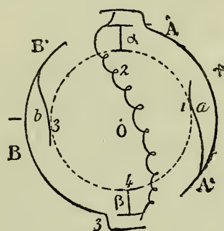


Fig. 207.

ducteur AA' et sa charge doit se porter à la surface. Cette pièce arrive alors en 2 ; mais le système $\alpha\ \beta$ est soumis à la double influence des pièces A et B, influence qui a pour effet d'amener 2 à posséder une charge — et 4 à être électrisé positivement. La pièce mobile, au contact de 2, se chargera donc négativement et arrivera avec cette charge — à la position 3 en contact avec le ressort *b;* là, se trouvant à l'intérieur du conducteur B, elle se déchargera et la tension négative sur B augmentera d'autant. Cette pièce ainsi ramenée à l'état neutre parviendra en 4 et se trouvant en contact avec le ressort β se chargera positivement, car, nous l'avons déjà dit, sous la double influence des pièces A et B, β est électrisé positivement. Enfin cette pièce arrivant au contact du ressort *a* sera ramenée à l'état neutre mais en augmentant la charge + sur A. Donc après un tour les choses se retrouveront dans le même état qu'au départ, avec cette seule différence que les tensions de A et B auront augmenté. Une nouvelle révolution produirait donc un effet analogue.

En continuant à faire tourner la pièce mobile, on fera croître la tension sur A et sur B jusqu'à ce que les pertes, qui sont inévitables et qui croissent avec la tension, deviennent égales aux charges apportées par la pièce mobile.

Il existe en réalité deux pièces mobiles diamétralement opposées : on reconnaît facilement que leur fonctionnement simultané est indépendant en tous les points excepté lorsqu'elles sont en contact avec α et β aux points 2 et 4 et que, alors, leurs effets sont concourants.

Cet appareil présente un avantage très réel : c'est que si on le fait tourner en sens contraire il tend à ramener A et B au même potentiel, comme le montre aisément un raisonnement analogue au précédent. Par suite de cette propriété, on arrive à donner et à maintenir entre les deux conducteurs A et B une différence de potentiel déterminée à l'avance : il suffit de tourner dans un sens ou dans l'autre l'arbre qui porte les pièces métalliques mobiles suivant que cette différence décroît ou croît.

On conçoit aisément que, au lieu d'avoir deux pièces métalliques isolées reliées à l'axe de rotation, on en pourrait avoir un plus grand nombre adaptées, par exemple, à un disque isolant mobile : l'effet serait le même pour chaque paire de pièces diamétralement opposées, et pour un tour de l'arbre de rotation, l'effet sera d'autant plus considérable qu'il y aura un plus grand nombre de pièces métalliques.

314. Machine de Varley. — M. Varley a indiqué en 1860 un appareil basé sur l'influence et destiné à convertir en électricité à des potentiels différents le travail fait pour surmonter des forces électrostatiques. Nous empruntons cette description à l'ouvrage de M. Fleeming Jenkin (*Electricity and Magnétism*).

Une série de secteurs métalliques c sont fixés à un disque d'ébonite b que l'on fait tourner autour d'un axe a perpendiculaire à son plan; ils portent des parties saillantes d. Le disque tourne devant deux plateaux métalliques isolés e et e' appelés *inducteurs* : ce sont, par exemple, des feuilles métalliques collées sur un disque isolant fixe f. Ces inducteurs portent en g et g' des contacts métalliques (frottoirs à ressort ou balais) qui sont mis en contact successivement avec les secteurs c par l'intermédiaire des parties saillantes d. Enfin deux autres contacts métalliques h et h', qui de même touchent successivement les mêmes secteurs, sont isolés des inducteurs et mis en communication avec la terre.

Supposons qu'une petite charge positive existe sur l'inducteur e : elle agira par induction sur le secteur c et lorsque celui-ci sera

amené en contact avec h, qu'il abandonnera aussitôt, il restera chargé négativement. A cet instant e et c constituent un condensateur qui subsistera tant que c sera en présence de e. Le plateau tournant, le secteur considéré arrive à toucher g' et par suite est en communication avec l'inducteur e' que nous admettons être d'abord à l'état neutre. Alors l'équilibre électrique s'établira entre c et e', ce dernier prenant alors une charge négative, tandis que la charge de c aura diminué. Mais le contact ne dure pas, le secteur e et l'inducteur se séparent, il y a influence de l'un sur l'autre, et

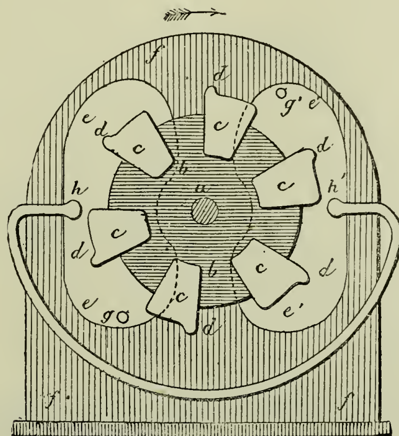


Fig. 208. — Machine électrique de Varley.

quand c arrive au contact de h' l'équilibre qui tend à s'établir, et qui s'établit en effet, donne à c une charge positive, par suite de la communication de h' avec le sol.

La rotation continuant, le secteur considéré possédant une charge positive vient rencontrer le frottoir g. Il se produit un effet analogue à celui que nous venons d'indiquer pour l'autre frottoir g' et l'autre secteur. La question est un peu moins simple cependant, car le secteur e n'est pas à l'état neutre, mais possède la charge positive que nous avons admise au début. Mais il faut remarquer que, à l'instant où le secteur considéré touche g, le secteur précédent touche h, et que le secteur situé encore plus loin et qui vient de se charger par influence au contact de h maintient le maximum de charge sur la partie de l'inducteur e opposée à g, de telle sorte que l'équilibre qui s'établit entre le secteur et g a pour effet

d'accroître la charge électrique de ce contact et par suite de l'inducteur électrique tout entier.

A la suite, les mêmes effets se reproduisent de même pour chaque secteur, de telle sorte que chaque contact avec les frottoirs en g ou g' augmente la charge de l'inducteur correspondant. Si donc, les inducteurs sont reliés à des tiges métalliques dont les extrémités sont voisines, des étincelles éclatent d'une manière continue entre celles-ci.

Les contacts h et h' peuvent n'être pas en communication avec le sol, pourvu qu'ils communiquent entre eux; comme ils sont rencontrés en même temps par des secteurs diamétralement opposés, les effets qui se manifestent et qui tendent à amener ces contacts à des charges inverses se produisent à travers la tige de communication.

Ajoutons enfin que, dans ce cas, l'un des inducteurs peut être relié au sol; c'est l'autre inducteur sur lequel on observe la charge électrique et duquel on peut tirer les étincelles.

315. Machine Tœpler. — Soient deux condensateurs A, B et C, D :

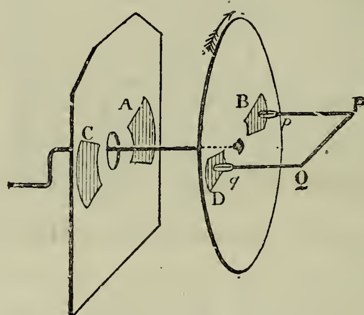


Fig. 209.

les lames A et C sont fixes, les lames B et D sont mobiles. Celles-ci sont portées sur un disque de verre qui tourne; lorsqu'elles parviennent en face de A et de C, elles sont mises en contact avec des balais portés par une tige métallique P Q.

Lorsque les pièces mobiles sont en regard des pièces fixes, elles se chargent, B prenant une charge négative, D une charge positive, et par conséquent de l'électricité passant de la première de ces plaques à la seconde par la tige métallique de P vers Q. Mais ce passage d'électricité s'interrompt sitôt que le contact a cessé en p et q.

Après une demi-révolution, le plateau B est venu en face de C et le plateau D en face de A; les pièces métalliques en regard ont

actuellement des charges de même nom ; cette distribution électrique ne peut pas subsister, puisque les plaques en présence doivent être chargées contrairement ; donc l'électricité qui est en excès en D s'écoulera en B, non seulement jusqu'à ce que D et B aient la même charge, mais jusqu'à ce que D soit devenu négatif et B positif. Pour arriver à ce résultat, il aura donc fallu qu'un flux d'électricité traverse la tige P Q de P vers Q, c'est-à-dire dans le même sens que précédemment.

A partir de cet instant, les phénomènes se reproduisent de la même façon et dans le même ordre, de telle sorte qu'à chaque contact la

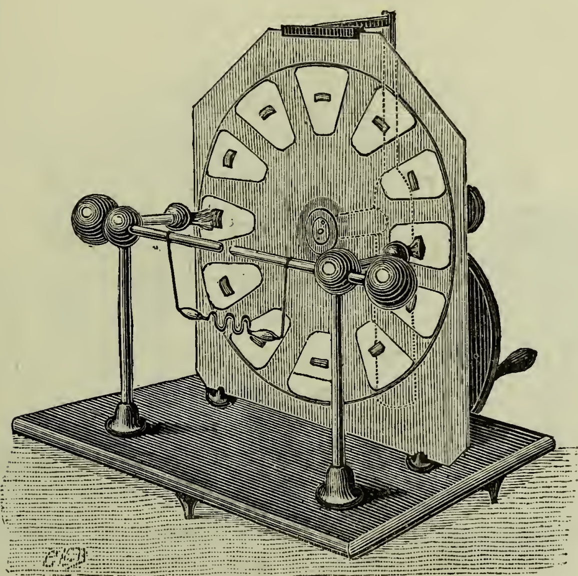


Fig. 210. — Machine Tœpler. (*La Lumière électrique.*)

tige métallique P Q sera traversée par un flux d'électricité allant de P vers Q, flux qui pourra même vaincre une certaine résistance, si elle n'est pas trop considérable, et passer à travers un tube de Gassler, donner naissance à de petites étincelles.

Pour éloigner le plateau B de A, lorsqu'ils sont chargés contrairement et pour approcher A de C qui possède une charge de même nom, il faut vaincre d'abord la force attractive, puis la force répulsive. Il faut donc dépenser un certain travail mécanique qui est justement représenté (indépendamment des frottements) par le mouvement de l'électricité dans la tige P Q.

En réalité, il y a non pas deux secteurs, mais un nombre pair quelconque de secteurs métalliques formant des couples, qui se comportent tous comme celui que nous avons seulement considéré, de telle sorte que pour un tour l'action est multipliée par le nombre des couples.

La charge des conducteurs, des inducteurs A et C, diminue nécessairement par les pertes diverses, et au bout d'un certain temps la machine cesse de fonctionner. Aussi M. Tœpler a-t-il imaginé d'autres dispositions pour parer à cet inconvénient; l'une d'elles consiste dans l'accouplement de deux machines analogues, dont l'une est

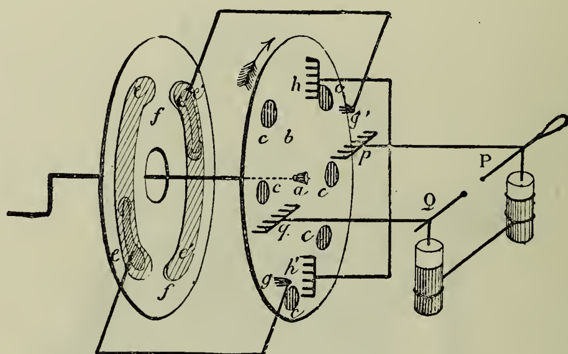


Fig. 211.

utilisée pour maintenir et accroître la charge des inducteurs de l'autre.

Outre le fait que la machine simple de Tœpler ne se surexcite pas, pour ainsi dire, par elle-même, et que, dès lors, les pertes la déchargent promptement, il faut remarquer que ce n'est pas, comme précédemment, les charges des inducteurs que l'on utilise, mais celles des induits.

Tœpler a construit plusieurs autres modèles de machines, les uns analogues comme dispositions générales aux machines précédentes, les autres à plateaux multiples destinées à donner de grandes quantités d'électricité à la fois : une de ces machines, qui présentait soixante plateaux, figurait à l'exposition d'électricité de 1881.

Ces machines ne se sont pas répandues en France, où il n'en existe que de rares modèles dans quelques collections. Nous ne nous y arrêterons pas et nous décrirons la machine de Voss qui commence à être employée, mais qui ne paraît en rien différente au fond de l'un des modèles de Tœpler.

316. Machine de Voss. — La machine de Voss (fig. 212) comprend un plateau fixe a (fig. 211) et un plateau mobile f; elle ressemble beaucoup, dans son mode de fonctionnement, à la machine de Varley. Les secteurs, au nombre de 6, sont remplacés par des disques métalliques c présentant un bouton au centre : les inducteurs sont des arcs formés par des feuilles d'étain e,e' ayant une étendue de 60°, terminés par de petits disques métalliques et fixés sur une feuille de papier dont l'étendue dépasse 120°, qui est collée sur la face du plateau fixe opposée au plateau mobile. Le contact des inducteurs avec les secteurs s'établit par l'intermédiaire de tiges métalliques recourbées $eg,e'g'$, portées d'une part sur les arcs inducteurs et, d'autre

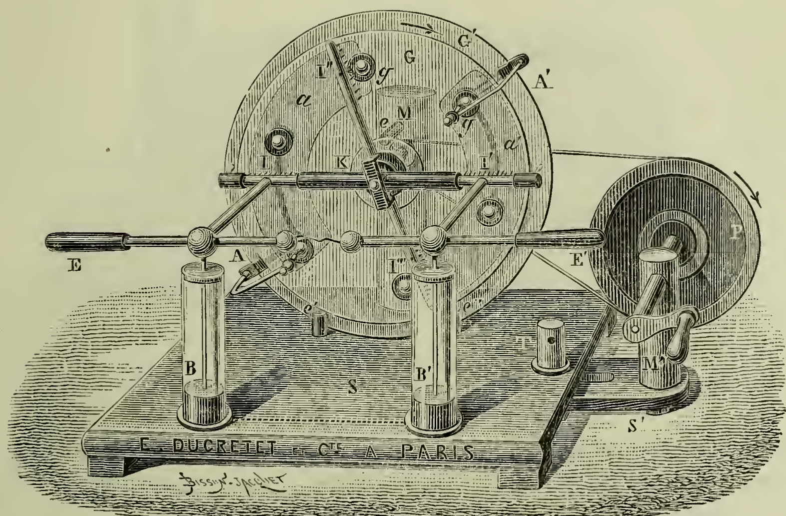


Fig. 212. — Machine de Voss. (*Ducretet.*)

part, portant un balai contre lequel viennent passer successivement les disques mobiles. Une tige métallique hh' terminée par deux peignes et deux balais établit la communication entre les disques opposés au moment où ils sont soumis à l'influence des inducteurs.

La différence avec la machine de Varley consiste en ce que l'on ne recueille pas l'électricité dont les charges vont en augmentant sur les inducteurs, mais au contraire l'électricité qui se manifeste sur les induits, comme dans la machine de Holtz. A cet effet, des peignes p et q ramènent à l'état neutre les secteurs qui passent devant eux en donnant passage à un flux d'électricité qui tend à aller

de l'un vers l'autre. Comme dans la machine de Holtz, ce flux est employé à charger des condensateurs, et l'on utilise la décharge de ces condensateurs qui se produit presque continuement.

317. Machine rhéostatique de Planté. — Les machines d'induction donnent un moyen d'obtenir, à l'aide d'une pile à faible tension, de grandes différences de potentiel et par suite de produire des effets analogues à ceux des machines à frottement. M. Planté a indiqué une autre solution basée sur l'emploi des condensateurs à lame iso-

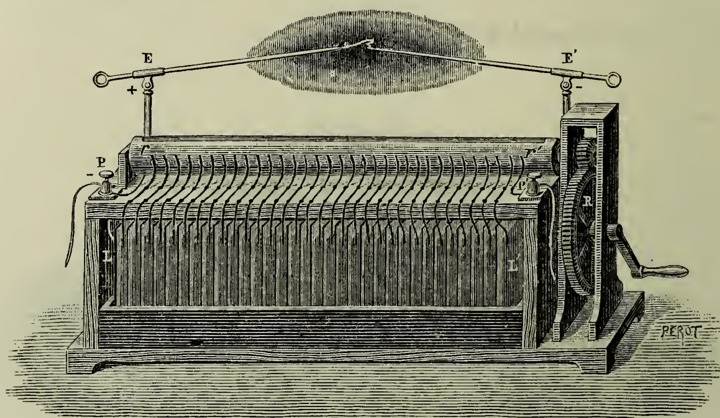


Fig. 213. — Machine rhéostatique. (*Planté.*)

lante très mince qui se chargent avec une grande rapidité sous l'influence d'une pile.

La machine rhéostatique (fig. 213) qu'il a construite est composée d'un nombre variable (10 à 80) de condensateurs L, L' constitués par des lames minces de mica, sur les deux faces desquelles on a collé des feuilles d'étain; ces condensateurs sont placés parallèlement, et des fils métalliques façonnés en ressort sont adaptés à chacune de ces lames. Ces fils sont placés alternativement de part et d'autre d'un cylindre d'ébonite *rr'* monté horizontalement au-dessus de ces condensateurs et contre lequel ils appuient. Ce cylindre porte diamétralement opposées deux bandes métalliques contre lesquelles viennent s'appliquer les ressorts pour une certaine position du cylindre. Lorsque les contacts sont ainsi établis, ces deux bandes communiquent également avec les deux pôles d'une pile puissante (la puissance de la pile dépend de la grandeur de la machine : on peut réussir avec 50 ou 60 éléments Bunsen à grande surface; pour une machine à 80

condensateurs, M. Planté a employé jusqu'à 800 éléments de sa pile secondaire); cette pile, qui doit fournir une grande quantité d'électricité, charge en un temps très court le condensateur à grande surface formé par la réunion des divers condensateurs partiels.

Mais, en outre, le cylindre d'ébonite est traversé de part en part par des tiges métalliques qui se terminent par des boutons métalliques rangés le long de deux génératrices, à moitié distance entre les bandes précédemment indiquées; ces tiges sont placées de manière à réunir une armature de chaque condensateur avec l'armature opposée du condensateur voisin : autrement dit, tandis que précédemment les condensateurs étaient montés en *quantité*, ils sont maintenant montés en *tension*. Les deux tiges extrêmes communiquent alors avec les conducteurs entre lesquels on veut faire jaillir l'étincelle, tandis que la pile est complètement en dehors du circuit : ces deux conducteurs se trouvent à une différence de potentiel d'autant plus grande que le nombre des condensateurs est plus grand, et cette différence de potentiel, comparable à celle que fournissent les machines à frottement, permet la production d'étincelles de 12 centimètres pour une machine à 80 condensateurs.

Le cylindre d'ébonite reçoit, à l'aide de roues d'engrenage R mues par une manivelle, un rapide mouvement de rotation : 15 tours par seconde; l'effet de charge et de décharge successives se reproduit donc 30 fois par seconde, ce qui donne naissance à un trait de feu qui semble continu, bien qu'il soit en réalité interrompu 30 fois par seconde.

M. G. Planté a fait à l'aide de cette machine rhéostatique d'importantes recherches qu'il serait impossible de résumer[1].

1. Voir *Recherches sur l'électricité*, par G. Planté, Paris, 1879.

CHAPITRE VI

DES PILES

318. Des piles. — Nous ne pouvons nous proposer de décrire toutes les piles qui ont été inventées et nous nous restreindrons à celles qui paraissent être entrées réellement dans l'usage des laboratoires ou de l'industrie; le nombre n'en est pas très consdérable, surtout si nous nous arrêtons seulement aux types usités en France. Nous indiquerons seulement aussi la disposition des éléments, nous réservant de traiter dans un autre chapitre les divers groupements que les constructeurs ont adoptés pour des usages particuliers : nous ferons exception pour la pile secondaire Planté, parce que le mode de groupement y est lié directement à la charge et à la décharge.

Nous terminerons le chapitre par la description d'une pile thermo-électrique, la seule qui soit employée effectivement pour donner naissance à des courants.

319. Pile a colonne. — Nous passerons très rapidement et sans insister sur les premiers modèles de piles, dont il est cependant impossible de ne pas parler, mais qui ne sont plus usitées à cause de leur rapide polarisation.

La pile à colonne a été la première réalisation de l'idée de Volta : elle était constituée par la superposition de disques de zinc et de cuivre et de rondelles de drap imbibées d'eau acidulée par l'acide sulfurique, maintenus entre des baguettes en verre qui permettaient de donner à l'ensemble une assez grande hauteur, ce qui justifie le nom de la pile. Les disques et rondelles devaient être superposés toujours dans le même ordre, par exemple :

Cuivre.
Drap acidulé.
Zinc.
Cuivre.
Drap.
....

On retrouve dans cette disposition les éléments que nous avons signalés dans la théorie des piles à un seul liquide, et le couple comprend l'ensemble : *cuivre, drap, zinc,* le cuivre étant le pôle +, et le zinc le pôle —.

Outre les inconvénients inhérents aux piles à un liquide (polari-

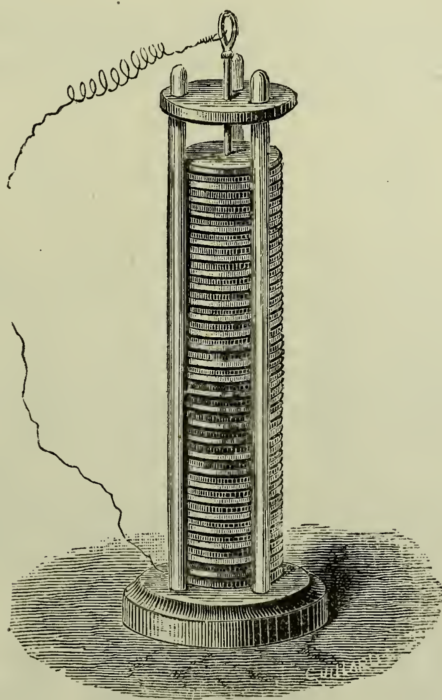


Fig. 214. — Pile à colonne.

sation des électrodes, 137), cette disposition est peu satisfaisante au point de vue pratique. Le poids de la colonne, pressant sur les draps, en chasse le liquide; ces draps deviennent moins conducteurs, et si même ils arrivent à se sécher à peu près complètement, l'action chimique cesse de se produire. De plus, le liquide en s'écoulant le long de la colonne établit des communications entre les divers couples, communications par lesquelles passe une partie du courant,

ce qui diminue l'intensité du courant qui passe dans le circuit extérieur. La pile de Volta sous cette forme est complétement abandonnée.

Lorsque l'on se reporte aux travaux anciens faits à l'aide de cette pile, on doit remarquer que le pôle + est signalé comme correspondant au zinc, et le pôle — au cuivre. Cela tient à ce que Volta,

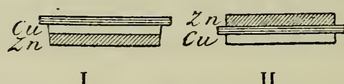


Fig. 215.

reportant au contact des métaux hétérogènes la production du courant, considérait (fig. 215, I) le couple comme autrement constitué qu'on ne le fait maintenant (II) :

	Drap.		Zinc.
I	Cuivre.	II	Drap.
	Zinc.		Cuivre.

En superposant ces couples, pour n éléments, il y avait n cuivres, n zincs et n-1 draps seulement. Mais alors, le zinc supérieur et le cuivre inférieur étaient inutiles. Le dernier zinc agissait seulement comme conducteur et jouait, comme le cuivre sur lequel il s'appuyait, le rôle de pôle +. Un effet inverse se manifestait à la partie inférieure : il n'y avait dès lors, ayant une utilité effective, que n-1 zincs, n-1 cuivres et n-1 draps, et la pile n'avait que n-1 couples.

320. Pile a couronne de tasses. — L'inconvénient résultant de la

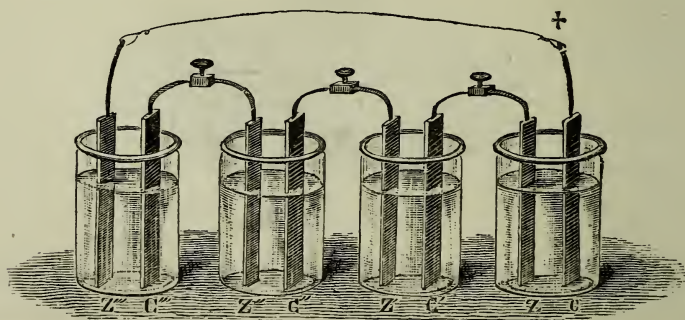


Fig. 216. — Pile à couronne de tasses.

dessication progressive des draps humides pouvait être aisément évité : pour y arriver, on disposait le liquide acidulé dans des vases de forme quelconque placés à côté les uns des autres. Des lames

formées de zinc et de cuivre soudées à une extrémité et recourbées plongeaient par les autres extrémités dans deux vases voisins, de manière à les relier métalliquement; l'orientation de ces lames était d'ailleurs la même pour toutes. Dans les vases extrêmes on plaçait d'une part une lame de cuivre, de l'autre une lame de zinc, qui servaient respectivement de pôle + et de pôle —.

Il est évident que cette disposition n'évitait en rien les inconvénients dus à la polarisation des électrodes.

Les vases ou tasses qui contenaient le liquide étaient généralement rangés en cercle, d'où le nom de *pile à couronne de tasses* ou, par abréviation, *pile à couronne.*

321. Pile de Wollaston. — Pour éviter la polarisation, Wollaston disposa les couples de manière que les actions chimiques ne pussent avoir lieu que pendant le temps où l'on utilisait réellement

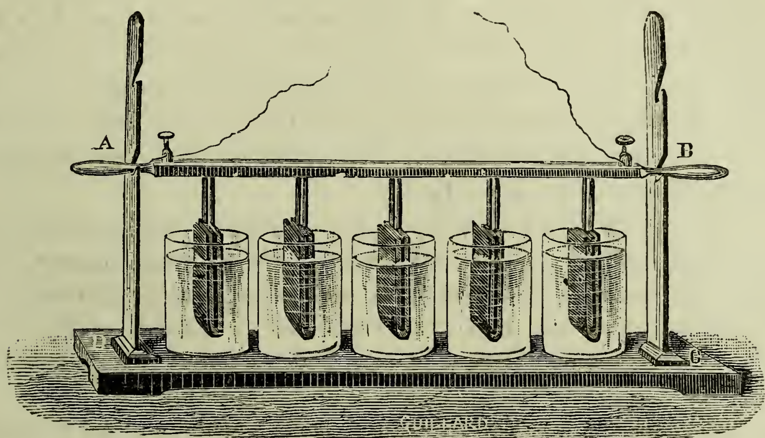


Fig. 217. — Pile de Wollaston.

le courant. Il plaçait à cet effet les vases contenant le liquide sur une seule ligne (fig. 217) : les métaux, disposés comme dans la pile à couronne, au moins comme groupement général, étaient tous fixés sur une même traverse en bois. Lorsque l'on abaissait celle-ci, les lames métalliques se trouvaient placées dans le liquide et la pile fonctionnait; mais le courant cessait de passer si on relevait la traverse, ce qui sortait les métaux hors du liquide acidulé, interrompait le circuit et faisait en même temps cesser toute action chimique.

La polarisation était donc limitée à la durée même pendant la-

quelle on utilisait le courant; disons de plus que le contact à l'air libre de ces lames sur lesquelles s'étaient condensés des gaz amenait même une dépolarisation qui ne se fût pas effectuée aussi complètement, même la pile ne fonctionnant pas, si les lames métalliques étaient restées dans le liquide.

Ajoutons que pour diminuer la résistance, Wollaston employait comme électrodes positives des lames de cuivre de grandes dimensions qui étaient repliées de manière à envelopper aussi complètement que possible la lame de zinc.

C'est dans un but analogue que l'on construisit les piles à hélice, dans lesquelles les lames de zinc et de cuivre étaient enroulées ensemble autour d'un axe vertical, les divers tours de spirale étant séparés les uns des autres par de l'osier ou tout autre corps mauvais conducteur. Les spirales métalliques correspondant aux divers couples étaient montées sur des traverses qui permettaient de les sortir ensemble du liquide acidulé. Cette disposition a été imaginée par Hase. Pouillet avait fait construire pour la Sorbonne une pile de cette nature présentant 12 couples de 5 à 6 mètres carrés chacun : les lames métalliques sont fixes et ce sont les seaux pleins d'eau acidulée qui montent ou descendent ensemble avec le plancher qui les supporte.

322. Piles d'Young et de Muncke. — Ces piles, qui permettent de réunir un grand nombre d'éléments sous un petit volume, sont formées de lames de cuivre et de zinc placées alternativement et plongeant dans un seul vase contenant le liquide acidulé. Les lames extrêmes de cuivre d'un côté et de zinc de l'autre servent de pôles.

Bien que la cause de la production du courant soit ici la même que dans les piles précédentes, il se présente une différence prove-

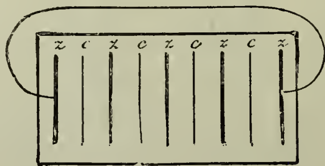


Fig. 218.

nant de ce que les lames successives plongent, non pas dans des liquides distincts, mais dans un seul et même bain acide.

Si l'on place dans un liquide acidulé (fig. 218) alternativement des lames de zinc et de cuivre, de telle sorte que l'on ait aux extré-

mités deux lames d'un même métal, il est évident, par raison de symétrie, que les deux lames extrêmes doivent être au même potentiel et que, si on vient à les réunir par un fil métallique, ce fil ne pourra être le siège d'aucune action particulière, il ne pourra être traversé par un courant.

Si les deux lames extrêmes sont de nature différente (fig. 219), l'une de cuivre et l'autre de zinc, il s'établira entre elles une différence de potentiel qui sera la même que si ces deux lames existaient

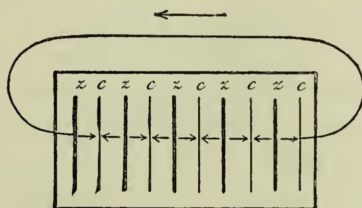


Fig. 219.

seules, les actions des autres lames s'entre-détruisant deux à deux, et le fil conjonctif sera traversé par un courant qui sera dû à l'action d'un couple unique.

Il n'en sera plus de même si les lames sont réunies métalliquement de deux en deux (fig. 220).

Si nous considérons par exemple les deux lames A,B, reliées entre elles par la pièce métallique *zc*, elles constituent avec le liquide

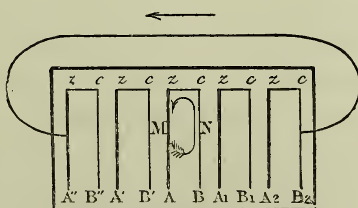


Fig. 220.

interposé un circuit qui sera parcouru par un courant local marchant dans le liquide du zinc au cuivre et allant dans la pièce *zc* du cuivre au zinc. Mais, dans ce circuit, la résistance liquide entre B et A est beaucoup plus grande que la résistance du métal *zc*, de telle sorte que la différence de potentiel qui, par suite de l'action chimique, s'est établie entre le zinc et le liquide se répartit très inégalement, et que la différence qui existe entre le potentiel du liquide

qui baigne la lame de zinc et le potentiel du cuivre est plus grande que celle qui existe entre le cuivre et le zinc à travers *zc* : donc la présence du couple AB aura amené une différence de potentiel entre le liquide compris dans l'espace M et le liquide compris dans l'espace N; les deux couples voisins A'B' d'un côté, et A_1 B_1 de l'autre ne se trouveront donc pas dans des conditions identiques, et comme ils agiront d'une façon analogue à celle que nous venons d'expliquer, ils augmenteront l'effet produit et la différence de potentiel due à leur action sera triple de ce qu'elle était entre M et N. L'effet se continuera de la même façon, augmentant avec le nombre des couples et proportionnellement à ce nombre.

Dans la pile de Muncke, l'effet est celui que nous venons d'indiquer, mais pour tenir moins de place les couples, tous constitués de même et orientés dans le même sens, sont imbriqués les uns dans les autres. En même temps que grâce à cette disposition on augmente le nombre de couples et par suite la différence de potentiel pour un espace donné, on diminue la résistance puisque l'on diminue l'épaisseur des couches de liquide traversées. Aussi les effets produits par cette pile sont-ils énergiques; mais leur durée est faible à cause de la polarisation qui se produit rapidement.

En général, toutes les pièces métalliques sont fixées à demeure dans un cadre en bois que l'on peut à volonté introduire dans l'auge contenant le liquide acidulé, ou en sortir pour le plonger dans de l'eau pure afin de hâter la dépolarisation.

323. Chaine galvanique de Pulvermacher. — Cet appareil a été proposé pour des applications médicales : c'est une forme particulière de la pile de Volta. Il est constitué (fig. 221) par une série d'éléments dont chacun est formé par deux fils, l'un de cuivre, l'autre de zinc, enroulés sur un cylindre de bois, dans deux sillons héliçoïdaux parallèles, ce qui évite tout contact. Les extrémités du fil de zinc communiquent par une articulation avec le fil de cuivre du couple suivant : les fils libres des couples extrêmes sont reliés à des poignées conductrices servant d'électrodes. L'ensemble forme une chaîne flexible que l'on plonge dans de l'eau vinaigrée au moment de s'en servir. On a évidemment ainsi une pile de Volta avec les inconvénients ordinaires de la polarisation.

Bien que cette pile puisse servir aux usages médicaux, elle ne présente aucun avantage particulier, sauf son petit volume, qui ne nous paraît pas compenser les inconvénients provenant de l'affaiblissement rapide du courant et de l'incertitude sur la grandeur des effets obtenus.

Ajoutons que, à l'aide d'un mécanisme à ressort disposé dans une pièce portée par l'une des électrodes, il est possible d'inter-

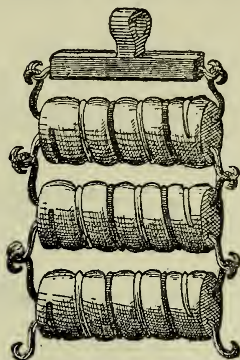


Fig. 221. — Pile de Pulvermacher.

rompre le courant d'une manière périodique, ce qui peut être utile dans quelques applications médicales.

324. Pile au chlorure d'argent. — M. Warren de la Rue possède une pile au chlorure d'argent (141), qui ne comprend pas moins de 14 400 couples et à l'aide de laquelle il étudie les effets de tension dans les piles. Les éléments dont il fait usage sont disposés ainsi qu'il suit.

Dans un vase en verre (fig. 222) fermé par un bouchon de paraffine se trouve une dissolution à 23 p. 100 de sel ammoniac dans l'eau. A travers ce bouchon passent une baguette en zinc et une lame d'argent; celle-ci est recouverte, sur la partie qui plonge dans le liquide, d'une couche cylindrique de chlorure d'argent fondu qui est entouré de papier A pour éviter tout contact accidentel avec le zinc; la lame d'argent passe à travers deux trous pratiqués dans le papier sur une même génératrice B, de telle sorte que le chlorure est immobilisé relativement au papier. Le zinc, qui ne doit pas être amalgamé (à cause de l'argent), doit être très pur : il présente vers son extrémité supérieure un trou horizontal dans lequel pénètre le fil d'argent de l'élément suivant qui y est fixé par une goupille légèrement conique C : le fil d'argent passe entre le vase et le bouchon. Celui-ci présente une autre ouverture par laquelle on introduit le liquide : on peut la fermer par un petit cylindre en paraffine, mais il ne faut pas rechercher une fermeture hermétique pour laisser passage au dégagement des gaz qui pourraient se produire.

Le vase de verre employé par M. Warren de la Rue a 3 centi-

mètres de diamètre et 13 de hauteur. La résistance d'un élément est de 5 ohms environ; mais elle peut augmenter par suite du dépôt d'oxychlorure de zinc sur le zinc. La force électro-motrice serait

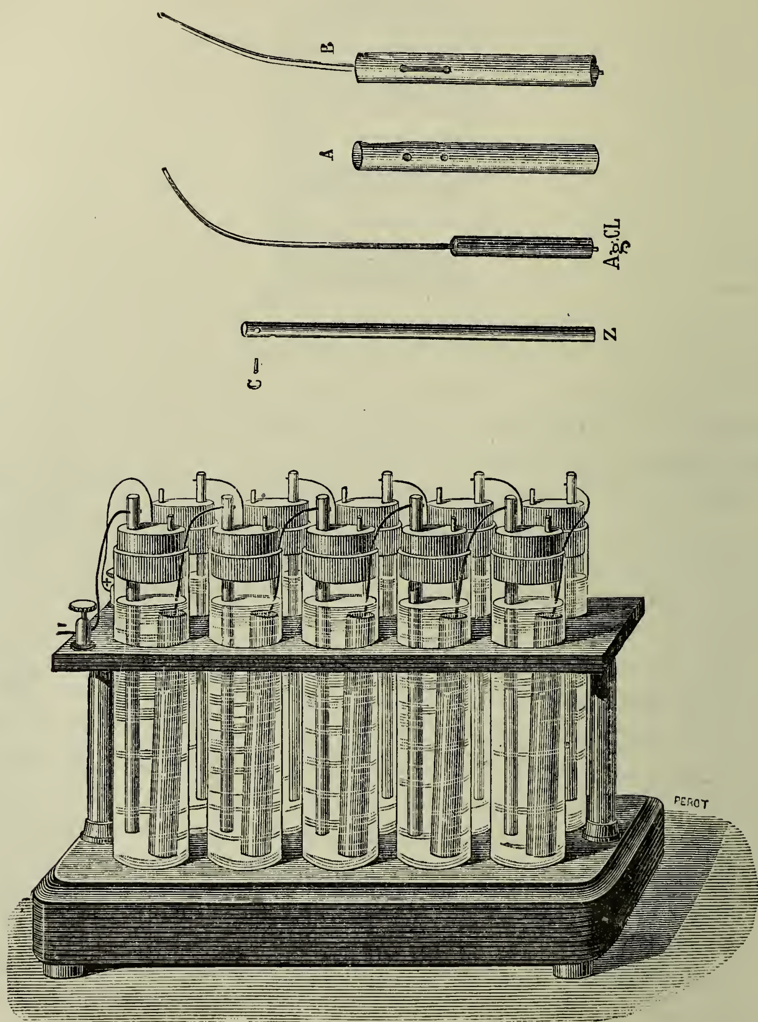


Fig. 222. — Pile au chlorure d'argent de Warren de la Rue.

voisine de 1 volt ($1^{v},03$) : dans les expériences de M. Warren de la Rue, il n'y a pas polarisation parce que le circuit n'est jamais fermé; mais, d'après M. Du Moncel, la force électro-motrice changerait peu, même après que le circuit serait resté fermé pendant 20 heures.

325. Pile de Gaiffe. — Gaiffe a disposé les éléments qui constituent la pile au chlorure d'argent dans un cylindre en ébonite complètement clos GT (fig. 223). Le chlorure Y moulé par fusion est maintenu à distance de la lame de zinc Z par des morceaux de caoutchouc : la lame de zinc et le chlorure sont reliés à des pièces métalliques V,V′ qui traversent le couvercle et servent de rhéophores. Le liquide est une dissolution à 2,5 p. 100 de chlorure de zinc.

Cette pile ne s'use pas quand le circuit est ouvert. Il importe de maintenir le couvercle très sec : autrement le circuit se complète par la partie humide, le courant se produit et la pile fonctionne.

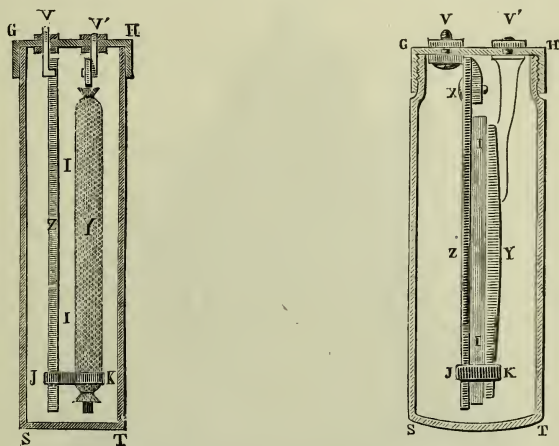


Fig. 223 et 224. — Éléments au chlorure d'argent. (*Gaiffe.*)

Dans certains cas, on peut vouloir éviter tout emploi de liquide : la pile comprend alors les mêmes éléments solides, mais entre le zinc et le chlorure d'argent on a introduit, de manière à établir la communication, quelques feuilles de papier buvard II (fig. 224) imbibées d'une solution à 5 p. 100 de chlorure de zinc. Le cylindre étant clos, le liquide ne s'évapore que très lentement; si d'ailleurs le papier vient à se sécher, il suffit de l'humecter pour que la pile fonctionne à nouveau.

326. Pile Leclanché. — Nous avons donné la composition des éléments de ce système : dans la pratique, ils sont généralement disposés comme il suit (fig. 225).

Le vase est en verre et de forme prismatique à base carrée, avec un large goulot circulaire présentant un prolongement vers l'une des arêtes du prisme : c'est par cette partie que s'introduit le zinc qui a été étiré sous forme d'un cylindre de 1 centimètre de dia-

mètre environ et amalgamé, tandis que par l'ouverture circulaire passe un vase en terre poreuse.

Dans le vase de verre, extérieurement au vase poreux, on verse, jusqu'à mi-hauteur environ, une dissolution de sel ammoniac. Dans le vase poreux, on place un mélange de peroxyde de manganèse et du charbon de cornue, à parties égales : au centre de cette masse, on introduit une lame de charbon qui sert de rhéophore et sur laquelle on place une poupée métallique.

Le plus souvent le mélange est recouvert d'une couche de résine,

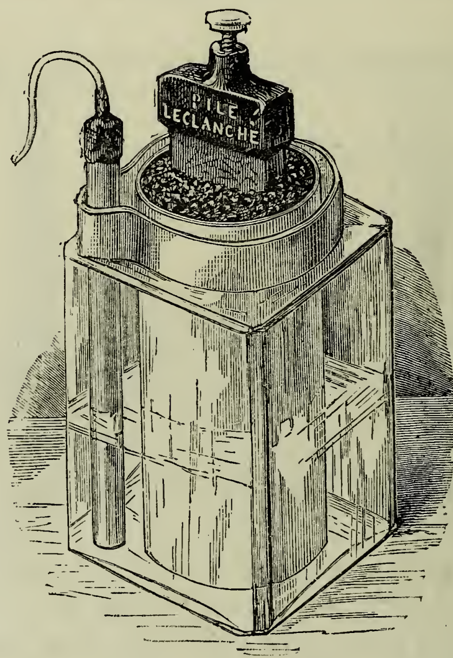


Fig. 225. — Pile Leclanché. (*Barbier.*)

d'arcanson fondu qui le maintient pendant le transport. Un trou qui y a été ménagé permet, au besoin, le dégagement des gaz.

Il convient d'employer du sel ammoniac pur et d'en mettre un excès dans le vase extérieur, excès qui se dissoudra au fur et à mesure de l'usage. Le bioxyde de manganèse ne doit pas être réduit en poudre : le manganèse aiguillé donne de bons résultats.

Cette pile a une force électro-motrice de 1,48 volt environ : la résistance du modèle de 14 centimètres de hauteur est à peu près de 6 ohms. Elle se polarise peu si le circuit extérieur a une grande

résistance; la polarisation est assez rapide si ce circuit a peu de résistance. Ceci revient à dire qu'elle ne peut pas fournir une grande quantité d'électricité en peu de temps sans se polariser; mais la force électro-motrice reprend sa première valeur si le circuit est ouvert, même pendant un temps court. Aussi cette pile est-elle principalement employée pour les usages où elle ne doit fonctionner que d'une manière intermittente, comme pour les sonneries, par exemple. Gaiffe a construit des piles du modèle Leclanché, mais dans lesquelles le charbon et le bioxyde de manganèse, au lieu d'être intimement mélangés, sont disposés par couches horizontales alternatives dans le vase poreux.

327. Pile Leclanché a agglomérés. — Une simplification a été apportée dans la construction des piles Leclanché : le vase poreux

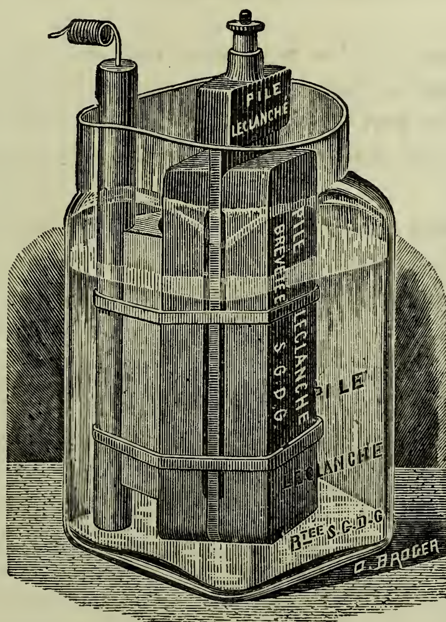


Fig. 226. — Pile Leclanché à agglomérés. (*Barbier.*)

est supprimé et le pôle positif est formé d'une baguette de charbon entourée d'une pâte agglomérée et solide contenant le charbon et le bioxyde de manganèse (fig. 226). Cette pâte est composée de : bioxyde de manganèse, 40; charbon, 52; gomme-laque, 5; bisulfate de potasse, 3. Elle est comprimée autour de la baguette de charbon à chaud (100°) et sous l'action d'une presse hydraulique (300 atmo-

sphères). L'addition de bisulfate de potasse a pour but de provoquer la dissolution de l'oxychlorure de zinc qui se forme toujours et qui se déposerait dans les pores du mélange.

Dans des modèles plus récents la matière agglomérée est obtenue sous forme de parallélipipèdes, d'une part; tandis que, d'autre part, le charbon qui servira de pôle positif est également disposé en lame. Pour monter la pile, on place le charbon entre deux plaques agglomérées; le zinc est séparé de ces plaques par un morceau de bois et le tout est maintenu serré, au contact, à l'aide d'anneaux de caoutchouc : on a ainsi un bloc solide que l'on plonge dans le liquide.

La résistance, qui est moindre que dans le cas où l'on emploie des vases poreux, dépend du nombre des plaques d'agglomérés : elle est respectivement de 1,8 ohms, 1,4 et 0,9 pour 1, 2 et 3 plaques.

Nous ajouterons que l'on a pu faire des éléments Leclanché qui sont hermétiquement fermés par un couvercle en ébonite, auquel on suspend d'une part le cylindre de zinc et d'autre part l'aggloméré. Les éléments de ce modèle peuvent être transportés sans inconvénient.

328. Pile simple a sulfate de mercure, modèle Gaiffe ; modèle Trouvé a renversement. — On obtient un couple qui peut être utilisé dans un assez grand nombre de circonstances (applications

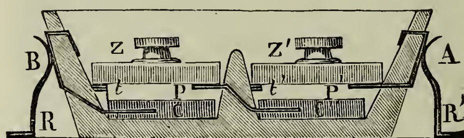


Fig. 227. — Pile à sulfate de mercure. (*Gaiffe.*)

médicales des machines d'induction) par la combinaison suivante :

Zinc. — Dissolution de sulfate de mercure. — Charbon.

Il se forme du sulfate de zinc et le mercure est mis en liberté : il peut, en partie au moins, se porter sur le zinc et l'amalgamer.

M. Gaiffe, qui a employé cet élément pour actionner les bobines d'induction médicale, lui a donné la forme suivante.

Cet élément (fig. 227) est constitué par une cuvette carrée (4^{cm} de côté) dont le fond est formé par une plaque C de charbon qui sert de pôle positif : on y verse une petite quantité d'eau et une pincée de sul-

fate de mercure. Dans ce liquide baigne une lame de zinc Z qui porte sur des rebords saillants ménagés sur les côtés et que l'on peut aisément déplacer à l'aide d'un bouton; cette lame est le pôle négatif.

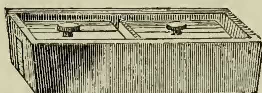


Fig. 228. — Pile Gaiffe au bisulfate de mercure.

Les éléments sont groupés par deux : un fil de platine P qui traverse la cloison intermédiaire fait communiquer le charbon du 1er élément avec le zinc du 2e, tandis que d'autres fils faisant saillie aux extrémités de la pile et servant de rhéophores aboutissent intérieurement au 1er zinc et au 2e charbon.

Cette pile peut fonctionner environ une heure lorsqu'elle est utilisée à actionner une petite bobine d'induction, temps très suffisant pour les usages auxquels elle est destinée. Il est inutile qu'elle ait une plus longue durée, car après chaque opération on jette le liquide et l'on charge la pile à nouveau.

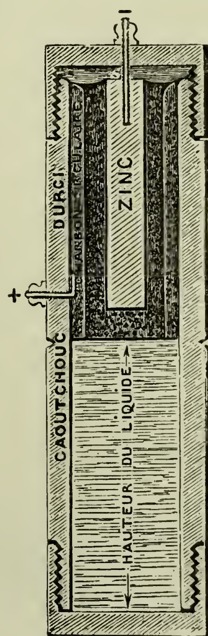


Fig. 229. — Pile hermétique, modèle Trouvé.

329. — M. Trouvé a donné à l'élément une forme qui le rend portatif: il est alors constitué par un cylindre en ébonite hermétiquement clos. Sur une moitié de sa hauteur, ce cylindre est garni intérieurement d'une couche de charbon qui servira de pôle positif et qui communique par un fil métallique traversant la paroi avec une borne fixée sur la surface latérale. Le zinc est un cylindre dont la hauteur est également la moitié de celle de l'étui et qui, placé au centre, est fixé à la base supérieure par une pièce métallique qui, traversant cette base, aboutit à une borne qui sert de pôle négatif. Enfin, on a mis dans le cylindre, avant de le fermer, de l'eau additionnée de sulfate de mercure (3 ou 4 grammes) en quantité suffisante pour remplir le cylindre à moitié.

Lorsque l'élément est placé verticalement, la borne négative à la partie supérieure, le liquide n'est pas en contact avec le zinc. Le

courant ne se produit pas et le zinc ni le liquide ne s'usent. Si au contraire on vient à coucher l'élément ou à le renverser complètement, le courant se manifeste aussitôt et continuera tant que le liquide excitateur ne sera pas usé. Comme l'élément ne fonctionne absolument que pendant le temps où le courant est nécessaire, il peut servir pendant un assez long temps pour les usages auxquels il est destiné (explorateur médical, etc.) sans qu'il soit nécessaire de changer le liquide, ce qui se fait d'ailleurs facilement, car le couvercle se dévisse.

330. Pile de Daniell. — Cette pile peut être regardée comme le type des piles à deux liquides. Elle se compose ordinairement, sous sa forme la plus simple, d'un vase cylindrique B (fig. 230) en terre ou en verre dans lequel se place le zinc amalgamé, sous forme d'une plaque rectangulaire que l'on a enroulée cylindriquement et qui porte sur son bord supérieur une lame de cuivre qui y est fixée et qui ser-

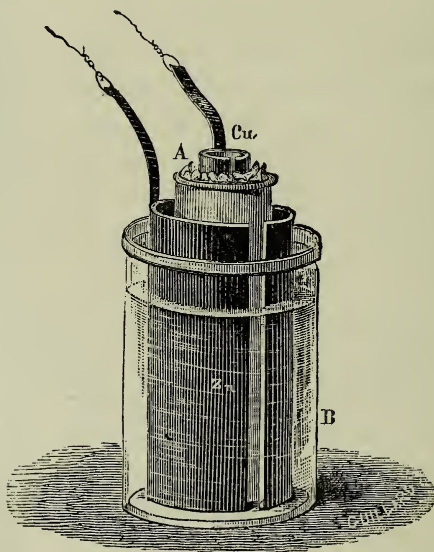


Fig. 230. — Élément de Daniell.

vira de rhéophore négatif. Dans l'espace compris par cette lame de zinc, on introduit un vase en terre poreuse A, et dans celui-ci le cuivre qui est le pôle positif. Le cuivre présente généralement aussi forme d'une feuille mince enroulée cylindriquement et porte une lame qui sera le rhéophore correspondant. Quelquefois le cylindre est complet et présente alors un certain nombre de tours pour donner libre passage au liquide.

Dans le vase extérieur, on met de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique (1 partie d'acide pour 10 d'eau); dans le vase poreux on met une dissolution saturée de sulfate de cuivre.

Comme nous l'avons dit (142), on peut remplacer l'eau acidulée par une dissolution de sulfate de zinc; on peut même, et c'est le cas le plus habituel dans la pratique, employer de l'eau pure.

L'expérience montre que, dans tous les cas, la force électromotrice reste à peu près constante; elle diffère peu de 1 volt et peut pratiquement être considérée comme ayant cette valeur (elle est 1v,079).

La pile ne se polarise pas, du moins d'une manière sensible, même par une action continue, c'est-à-dire que sa force électromotrice ne varie pas. Mais si l'on étudie l'intensité, elle ne reste pas invariable; si par exemple on avait monté la pile avec de l'eau pure, on voit au commencement l'intensité croître. Cet effet tient à ce que la résistance diminue : le sulfate de zinc qui entre en dissolution dans l'eau, rendant ce liquide meilleur conducteur, la pile devient moins résistante et le courant doit augmenter d'intensité.

La dissolution de sulfate de cuivre s'appauvrit et, de ce fait, la résistance croîtrait, ce qui serait un inconvénient; aussi, pour l'éviter a-t-on soin de placer au niveau de la surface supérieure de cette dissolution des cristaux de sulfate de cuivre qui sont supportés par une galerie ou une corbeille, ce qui maintient la saturation et assure par là même la dépolarisation. Le plus souvent, et bien que cela assure moins la saturation, on se borne maintenant à jeter de temps à autre quelques cristaux de sel au fond du vase poreux.

L'expérience montre que la pile Daniell s'use même lorsqu'elle reste en circuit ouvert : cela tient à ce qu'une partie du sulfate de cuivre traverse la paroi poreuse et agit sur le zinc, en donnant naissance à du sulfate de zinc et à du cuivre à l'état pulvérulent qui se dépose sur le zinc. C'est là une dépense de zinc sans utilisation aucune, et c'est un inconvénient, le seul que l'on puisse reprocher à ce couple qui, comme nous allons le dire, a servi de modèle à de nombreux éléments qui n'en sont que des modifications. Nous ne décrirons d'ailleurs que les formes qui se distinguent par quelque changement notable, en commençant par les piles dans lesquelles, les substances employées étant les mêmes que dans la pile de Daniell, les actions chimiques ne sauraient être différentes.

Nous dirons, sans insister, que les appareils galvanoplastiques dits simples sont en réalité des piles de Daniell.

Le zinc se trouve placé avec l'eau acidulée dans un vase poreux qui est plongé dans un bac contenant la dissolution de sulfate de cuivre : le pôle positif est formé par le moule plombaginé sur lequel se déposera le cuivre et qui devra être relié par un fil conducteur à la lame de zinc.

331. Pile de Gaiffe au sulfate de cuivre. — Dans cette pile, qui est constituée d'une manière générale comme la pile de Daniell, le

Fig. 231. — Élément de Gaiffe au sulfate de cuivre. (*Gaiffe.*)

vase intérieur n'est poreux que dans sa partie supérieure et le zinc qui l'entoure n'occupe également que la moitié supérieure du vase ; il résulte d'abord de là que le sulfate de cuivre qui a traversé la paroi poreuse, tombant au fond, à cause de la plus grande densité de sa dissolution, ne se trouve pas en contact avec le zinc. Il ne peut donc se produire d'action locale qui use ce métal.

De plus, un fil de cuivre est soudé au vase intérieur et, se recourbant, pénètre dans le liquide extérieur où il descend jusque vers la partie inférieure et se recourbe à nouveau de manière à entourer le vase poreux circulairement. Il résulte de cette disposition que lorsque l'on vient à fermer le circuit, un courant s'établit entre le

zinc et cet anneau de cuivre, et l'hydrogène qui accompagne sa production réduit le sulfate de cuivre qui se trouvait mélangé au liquide extérieur. Ce sel ne peut donc s'accumuler dans le liquide, qui reste pur, ainsi que le prouve son absence de coloration : le zinc reste, par suite, inattaqué ou à peu près quand le circuit est ouvert, d'où résulte une économie dans l'emploi de cet élément.

332. Pile Callaud. — Dans cette pile, où les actions chimiques sont identiques à celles de la pile de Daniell, le vase poreux est supprimé, ce qui réduit la résistance, et les deux liquides restent séparés seulement par la différence de densité. Le zinc se présente sous forme d'un cylindre annulaire qui n'occupe que la moitié supé-

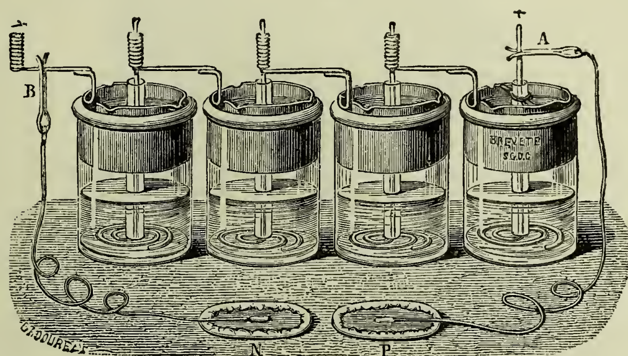


Fig. 232. — Pile Callaud.

rieure du liquide, tandis que le cuivre qui est placé au fond, au contraire, a la forme soit d'un autre cylindre annulaire, soit d'un disque, soit simplement d'un fil enroulé en spirale. A ce métal se trouve relié un fil de cuivre qui s'élève verticalement pour sortir du liquide et servir de rhéophore positif. Pour éviter que, par suite d'une action locale qui se produit au contact des deux liquides, ce fil ne se coupe, comme l'expérience a montré que cela se produisait, on le recouvre de gutta-percha ou d'un autre isolant dans sa partie verticale.

Cette pile, très avantageuse et qui est usitée en France dans une grande proportion pour les besoins des lignes télégraphiques, ne présente que l'inconvénient de ne pouvoir être transportée; mais dans bien des circonstances cet inconvénient ne se fait pas sentir.

La pile Trouvé-Callaud est une légère modification dans la forme de la pile Callaud.

La pile Meidinger, la pile d'Amico, sauf des changements de détails, sont analogues également à la pile Callaud.

333. Piles humides système Trouvé. — M. Trouvé a employé, pour le cas où la pile doit être transportée, des éléments sans liquide. Ces élements se composent de rondelles de papier buvard qui ont été trempées les unes dans une dissolution de sulfate de cuivre, les autres dans une dissolution de sulfate de zinc. On empile un certain nombre de rondelles d'une espèce, auxquelles on superpose un nombre à peu près égal de rondelles de l'autre espèce; puis on les presse entre deux disques l'un de cuivre, l'autre de zinc, chaque métal étant en contact avec le sel de même nature : des

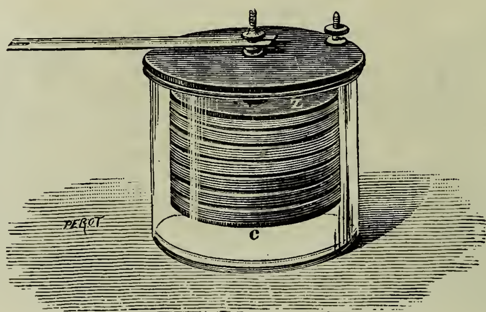


Fig. 233. — Pile humide. (*Trouvé.*)

tiges soudées à ces disques servent de rhéophores et permettent de relier chaque élément à d'autres, de manière à constituer une pile.

Pour faire fonctionner la pile, il suffit de la tremper pendant une minute environ dans de l'eau; lorsqu'on la retire, les papiers ont absorbé assez d'humidité pour devenir conducteurs et pour que les actions chimiques puissent se manifester.

Lorsque la pile est sèche, elle ne s'use pas; lorsqu'elle a été rendue humide, elle sèche plus ou moins vite suivant les conditions qui favorisent l'évaporation. Enfin quand le sulfate de cuivre est épuisé, il est facile de le remplacer. De plus ces éléments ne sont ni encombrants, ni fragiles; ils peuvent donc être utilisés dans un certain nombre de cas.

334. Pile de Sir William Thomson. — Cette pile, qui repose sur le même principe que la pile Callaud, en diffère beaucoup comme

forme : elle a été combinée pour présenter une très faible résistance.

Un élément de cette pile est formé par une cuve en bois en forme de trémie que l'on double intérieurement de plomb pour assurer l'étanchéité : sur le fond repose une lame de cuivre (cette lame manque quelquefois, et c'est alors le plomb même qui représente le pôle positif). Quatre cales de bois supportent, à une petite distance du fond, le zinc qui a été coulé en forme de gril ; on verse dans le vase la dissolution saturée de sulfate de cuivre et on ajoute pardessus, avec précaution, la dissolution de sulfate de zinc. Quelquefois, pour mieux assurer la séparation, le zinc est entouré d'une feuille de papier parchemin dans lequel on verse le sulfate de zinc ; mais cette précaution n'est pas nécessaire.

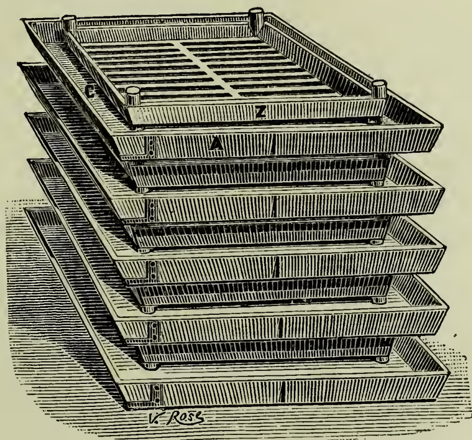


Fig. 234. — Pile de Sir William Thomson. (*La Lumière électrique.*)

Ces éléments s'accouplent en séries par leur superposition ; à cet effet, la feuille de cuivre porte un appendice de même métal qui est assez long pour se recourber sous la cuve et venir s'appuyer contre le zinc de l'élément situé au-dessous, contre lequel il est pressé par le poids des éléments supérieurs. On superpose ainsi ces éléments dix par dix, et l'on réunit ces colonnes les unes aux autres par de gros conducteurs n'offrant que peu de résistance.

Pour que cette pile fonctionne convenablement, il faut presque journellement enlever un peu de sulfate de zinc et le remplacer par de l'eau, de manière que la densité de la dissolution ne devienne pas assez considérable pour tomber au fond du vase : il faut éviter

de laisser la pile en circuit *ouvert*, sans quoi, par suite des actions locales, le cuivre se dépose sur le zinc.

Cette pile est, en réalité, d'un usage assez coûteux; elle est cependant employée avec avantage dans les cas où il faut un courant très constant et une faible résistance, comme pour le siphon-recorder, par exemple.

335. Pile Latimer Clark. — La pile Latimer Clark est une pile analogue entièrement à la pile de Daniell et qui n'en diffère qu'en ce que le cuivre y est partout remplacé par du mercure. Elle se compose des éléments suivants :

Zinc, sulfate de zinc — sulfate de mercure, mercure.

On la construit en versant dans un vase une couche de mercure qui servira d'électrode positive et dans laquelle plonge un fil de platine passant dans un tube de verre et dont l'extrémité opposée sera le pôle positif. Sur le mercure, on met une pâte formée de sulfate mercureux que l'on a fait bouillir avec une dissolution saturée de sulfate de zinc; enfin une plaque de zinc est suspendue dans la pâte et le vase qui renferme ces divers éléments est scellé à la paraffine.

Le sulfate mercureux est obtenu en chauffant avec de l'acide sulfurique du mercure en excès. La poudre blanche obtenue est lavée à grande eau, jusqu'à ce que le liquide ne devienne plus jaune, cette coloration indiquant la présence du sulfate mercurique.

Les éléments de ce type ne sont pas destinés à produire des courants utilisables; ils sont employés comme étalon, à cause de la grande constance de la force électro-motrice, constance qui est remarquable tant que la pile ne fonctionne pas, qu'elle est en circuit ouvert. Cette force électro-motrice est égale à 1,457 volt.

La variation de cette force électro-motrice est faible et assez régulière : on peut la considérer comme égale à 0,006 pour 1°C., au moins à la température ordinaire des laboratoires.

336. Pile de Bunsen. — La pile de Bunsen, comme celle de Grove, dont elle ne diffère que par la substitution du charbon au platine, métal trop coûteux, assure la dépolarisation des électrodes en faisant absorber l'hydrogène par un liquide oxydant qui est l'acide azotique. La disposition générale est la même que pour la pile de Daniell : dans un vase généralement en grès, on verse le liquide acide qui est de l'eau renfermant environ 1/12 d'acide sulfurique; un zinc, disposé comme dans les éléments Daniell, plonge dans ce liquide et sert de pôle négatif. A l'intérieur se trouve un vase poreux dans lequel on verse de l'acide azotique et où l'on plonge un paralléli-

pipède de charbon. Une pince spéciale adaptée à la partie supérieure de ce parallélipipède servira de pôle positif et pourra se relier à la lame de cuivre qui dans l'élément voisin est fixée au zinc par un rivet ou par une pince spéciale.

L'inconvénient très réel de cette pile, qui donne d'ailleurs de bons résultats, provient du dégagement de vapeurs nitreuses acides qui sont la conséquence de la réduction de l'acide azotique par l'hydrogène : aussi son emploi exige-t-il que la pile soit montée en dehors des pièces fermées, des chambres habitées, des laboratoires, des salles de collections, etc.

Dans les premiers modèles la disposition était renversée : on trouvait dans le vase poreux l'eau acidulée d'acide sulfurique et le zinc,

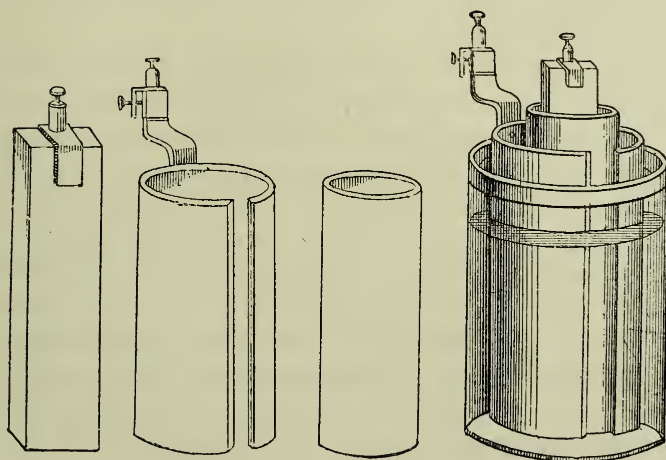


Fig. 235. — Élément de Bunsen.

et extérieurement on plaçait le charbon et l'acide azotique. Mais la forme de cylindre annulaire que l'on devait donner aux charbons était coûteuse et fragile, et le modèle actuel offre à cet égard un grand avantage.

Pour certaines expériences où l'on a besoin de grandes quantités d'électricité, on emploie des éléments dans lesquels le zinc présente une surface considérable. Pour que la place occupée par les éléments ne soit pas trop grande et que le groupement s'en fasse sans difficulté, on donne aux vases de grès une forme de parallélipipèdes rectangles aplatis. A l'intérieur on place un zinc deux fois recourbé, au milieu duquel s'introduit le vase poreux qui présente une forme

semblable à celle du vase extérieur. Enfin le charbon est en plaques minces qui pénètrent dans ces vases poreux. On voit que la surface du zinc est augmentée tout en diminuant le volume extérieur de l'appareil et que, de plus, le métal se trouvant ainsi rapproché du zinc autant que possible, la résistance est diminuée ; pour les piles grand modèle ayant $0^m,70$ de hauteur, la résistance tombe à 0,06 ohm.

L'avantage de ce modèle de pile provient, d'une part, de ce que sa force électromotrice est plus grande que celle de l'élément Daniell ; d'autre part, de ce que, à dimension égale, la résistance est plus faible : elle peut être considérée comme 15 à 20 fois moindre au début. Mais, et c'est là un inconvénient réel, la résistance de la pile Bunsen change notablement par suite des modifications de composition des liquides. Aussi le courant ne présente-t-il pas une constance pareille à celle des Daniell.

Nous ne nous arrêterons pas aux dispositions diverses que l'on a essayées pour faciliter le montage de la pile de Bunsen et éviter l'usure des zincs ou le mélange des liquides lorsque la pile ne fonctionne pas. Ces dispositions sont faciles à concevoir, à imaginer, et il ne semble pas qu'aucune ait donné dans la pratique des résultats assez satisfaisants pour que l'usage s'en soit généralisé.

337. Pile de Marié Davy. — La pile de Marié Davy peut être rapprochée de la pile de Bunsen dont elle diffère en ce que la substance qui produit la dépolarisation, au lieu d'être de l'acide azotique, est du sulfate de mercure. La disposition est celle même de la pile de Bunsen ; mais le charbon, placé dans le vase poreux au lieu de plonger dans un liquide, est entouré par une pâte liquide contenant le sel. Ce sel peut être le sulfate mercureux ou le sulfate mercurique ; les cahiers des charges de l'administration télégraphique française exigent l'emploi du sulfate mercureux.

Dans un cas comme dans l'autre, l'hydrogène provenant de l'action du zinc sur l'acide sulfurique passe à travers la paroi poreuse et, réduisant le sulfate, reforme de l'acide sulfurique (sulfate d'hydrogène) en mettant le mercure en liberté. Ce mercure tombe au fond du vase et vient baigner le pied du prisme de charbon.

Il importe de remarquer que le charbon joue seulement le rôle de conducteur et pourrait être remplacé par toute autre substance qui ne serait pas attaquée par le sel employé. On aurait pu, par exemple, prendre du mercure pour pôle positif, et alors la pile devrait être considérée comme se rapprochant absolument de la pile de Daniell dans laquelle le cuivre aurait été entièrement rem-

placé par le mercure. On voit d'ailleurs que lorsque la pile a commencé à fonctionner, il se dépose du mercure dans le vase poreux et que, de ce moment, cette assimilation est absolument justifiée.

Si l'on emploie le sulfate mercureux, comme ce sel est peu soluble, il passe difficilement à travers le vase poreux quand la pile ne fonctionne pas : la petite quantité qui peut passer est, d'ailleurs, sans inconvénient, car le mercure qui en résulte se porte sur le zinc dont il entretient l'amalgamation. Mais, par contre, la faible solubilité fait que la dissolution du sulfate s'épuise vite lorsque la pile fonctionne, que la résistance augmente rapidement et que, même, l'appauvrissement pourrait être tel que l'absorption de l'hydrogène dégagé ne put se produire que d'une manière incomplète. Il importe donc de ne pas faire fonctionner cette pile longtemps de suite, et de la laisser reposer de manière à permettre à la dissolution de se reformer.

Si l'on emploie le sulfate mercurique, au contact de l'eau il se décompose en un sel acide très soluble, ce qui dès lors évite les inconvénients que nous venons de signaler, et en un sel basique (turbith minéral) très peu soluble qui encrasse souvent les vases poreux et augmente ainsi la résistance. Aussi vaut-il mieux employer le sulfate mercureux, en réservant cette pile pour les usages intermittents qui ne demandent pas une grande dépense d'électricité.

Le prix élevé des sulfates de mercure est un désavantage ; mais il importe de remarquer que, grâce au mercure mis en liberté, on peut régénérer ces sels à peu de frais.

La force électromotrice de la pile de Marié Davy est d'environ 1,52 volt.

338. Pile au bichromate de potasse. Pile Grenet. — Cette pile, qui comprend du zinc et du charbon plongeant dans une dissolution de bichromate de potasse dans de l'eau acidulée d'acide sulfurique (143), a reçu des formes différentes.

Sous la forme la plus simple, le liquide est placé dans un vase cylindrique en grès vernissé dans lequel plongent du zinc et du charbon. Généralement, on dispose une lame de zinc entre deux lames de charbon réunies entre elles par une lame métallique qui sert de pôle positif, tandis que le zinc est, comme toujours, le pôle négatif. Il serait possible qu'il y eût avantage même à employer un plus grand nombre de lames de charbon, mais cette disposition n'est pas encore usitée dans la pratique.

Comme cette pile, qui présente une grande force électromotrice,

2 volts environ, ne se dépolarise pas absolument et que le courant s'affaiblit assez rapidement, il faut ne laisser le zinc dans le liquide

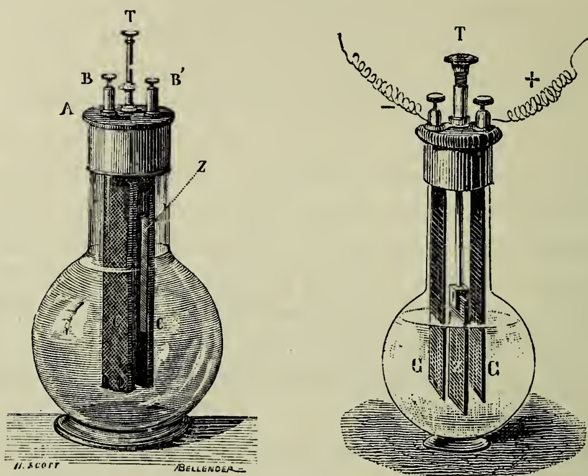


Fig. 236 et fig. 237. — Éléments Grenet.

que pendant le temps strictement nécessaire; lorsque l'on a plusieurs éléments constituant une pile, on emploie la disposition que

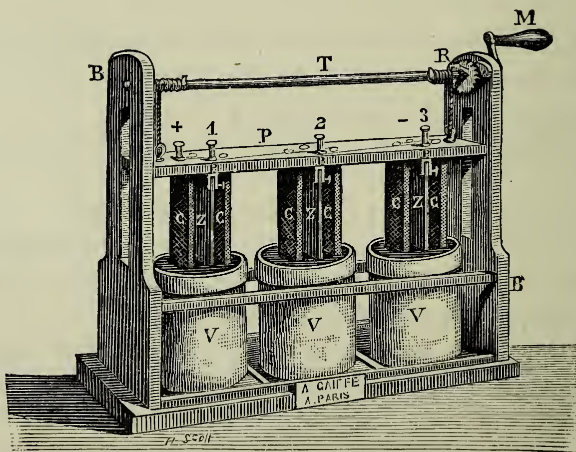


Fig. 238. — Pile au bichromate de potasse.

nous avons décrite déjà à propos de la pile de Wollaston : les charbons et les zincs sont tous fixés sur une traverse que l'on peut

élever à l'aide de cordes s'enroulant sur un treuil, ce qui permet de sortir toutes les lames hors du liquide. Le contact de l'air contribue pour une part à faire dégager l'hydrogène.

M. Grenet a adopté une forme d'éléments qui donne de bons résultats pratiques (fig. 236 et 237). Le vase en verre présente à sa partie inférieure un renflement sphérique d'assez grande capacité. La partie supérieure est cylindrique; elle supporte une garniture en ébonite à laquelle sont suspendues deux lames de charbon réunies à une borne qui sert de pôle positif. Dans ce couvercle passe une tige en laiton glissant à frottement dans un canon métallique et à l'extrémité inférieure de laquelle est soudée une lame de zinc, tandis que l'extrémité supérieure est reliée à une borne qui sert de pôle négatif. La lame de zinc a une hauteur moitié moindre environ que les lames de charbon, et la tige de laiton a une longueur telle que le zinc peut être descendu jusqu'au fond du vase qui n'est rempli de liquide que dans sa partie sphérique. L'élément est prêt à fonctionner lorsque le zinc est descendu à fond de course; si, au contraire, on le relève de manière à le sortir hors du liquide, le courant cesse de passer, le zinc n'étant plus attaqué. Le maniement de l'élément est donc très aisé; à cause du rapprochement des lames de zinc et de charbon, la résistance est faible. Le courant n'est pas constant et s'affaiblit peu à peu; mais cependant, à cause de la grande quantité relative du liquide, la polarisation n'est pas trop rapide.

Le liquide dont on fait usage a généralement la composition suivante :

Eau....................................	100	ou 100
Acide sulfurique..........................	10	— 21,4
Bichromate de potasse....................	5	— 9,2

La dissolution du sel doit se faire à chaud; on ajoute ensuite l'acide sulfurique.

On trouve dans le commerce le liquide tout préparé; mais il est acide et son maniement peut n'être pas sans danger. Voisin et Drosnier ont obvié à cet inconvénient en formant une combinaison de bichromate et d'acide sulfurique qui, étant solide, se transporte sans inconvénient aucun : on effectue la dissolution seulement au moment de monter la pile.

Il va sans dire que, dans cet élément, le liquide s'épuise, et comme acide et comme sel dépolarisant, et que, dès lors, il est nécessaire de le changer après un certain temps de service.

Il se forme quelquefois sur le charbon un dépôt pulvérulent qui,

peu conducteur, augmente la résistance. Pour parer à cet inconvénient et maintenir plus constante l'intensité du courant, on peut agiter le liquide qui fait tomber le précipité au fond du vase et découvre ainsi la surface conductrice de charbon. On a proposé pour obtenir cette agitation d'insuffler de l'air au fond du liquide, le bouillonnement produit par le passage des bulles produisant l'effet cherché. Mais cette disposition complique l'appareil et paraît ne pouvoir être appliquée utilement que dans quelques cas très spéciaux.

M. Camacho et M. Chutaux ont cherché à obtenir un résultat analogue par une circulation du liquide provenant naturellement de la mise en communication, au moyen de tubes ou de siphons, de vases placés à des hauteurs différentes.

Nous dirons enfin qu'il existe des piles au bichromate dans lesquelles on emploie des vases poreux : le zinc est plongé dans l'eau acidulée d'acide sulfurique et le charbon dans le liquide dépolarisant formé de :

Eau	100
Acide sulfurique	25
Bichromate de potasse	12

Les éléments Camacho présentent cette disposition : on leur a donné la forme et les dimensions des éléments rectangulaires Bunsen.

339. Piles a retournement : Pile Trouvé; Pile Fauché. — M. Trouvé

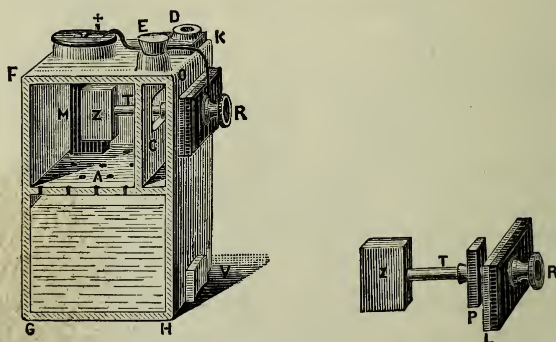


Fig. 239. — Pile Fauché.

a appliqué son modèle à retournement aux piles au bichromate : il n'y a rien à changer à ce que nous avons dit précédemment (329), si ce n'est que le liquide a une composition analogue à celle que nous venons d'indiquer.

M. Fauché a imaginé une autre disposition (fig. 239) : la pile consiste en un vase rectangulaire en porcelaine fermé de toutes parts sauf quatre ouvertures et présentant intérieurement deux cloisons A et C. Une lame de charbon M placée à demeure communique à une borne située extérieurement et qui sera le pôle positif; la seconde ouverture donne passage à une tige métallique qui, terminée extérieurement aussi par une borne R, porte à l'autre extrémité un morceau de zinc Z; la troisième ouverture D, munie d'un bouchon de caoutchouc, doit être rendue libre pendant le fonctionnement de la pile, pour donner passage aux gaz qui peuvent se dégager par suite de l'action chimique. Enfin le liquide, qui est le même que dans les modèles précédents et qui est par conséquent à la fois excitateur et dépolarisateur, est introduit dans la pile. Lorsque celle-ci est dans la position de la figure 239, le zinc n'est pas en contact avec le liquide, il n'y a pas d'action chimique, il n'y a pas de courant. Si, au contraire, on la retourne de 90°, le zinc est en contact avec le liquide et le courant s'établit.

On comprend facilement, d'après les indications de ces figures, comment on remplace le zinc lorsqu'il est usé, et comment on peut changer le liquide.

340. — M. Gaston Tissandier a étudié les dispositions que l'on peut adopter pour obtenir, des piles au bichromate, le meilleur rendement sous le poids le plus faible. Voici la disposition à laquelle il s'est arrêté.

La pile est formée par une auge en ébonite de 3 millimètres d'épaisseur, 35 centimètres de longueur, 14 de largeur et 16 de hauteur. Dans cette pile sont disposés alternativement 13 charbons et 12 zincs réunis entre eux de manière à former un seul couple à grande surface : les zincs ont une surface qui est la moitié seulement de celle des charbons. Le liquide employé a la composition suivante en poids :

Eau..	100
Bichromate de potasse............................	16
Acide sulfurique................................	37

Le vase d'ébonite présente à sa partie inférieure une tubulure qui, à l'aide d'un conduit en caoutchouc, communique avec un récipient que l'on peut lever ou abaisser de manière à déplacer le liquide à volonté et à ne le laisser dans la pile que pendant que celle-ci fonctionne, ce qui facilite et hâte la dépolarisation. Il est avantageux que le liquide soit chauffé vers 30° environ.

Dans ces conditions, M. G. Tissandier a réalisé des piles légères, 24 éléments ne pesant que 168 kilogrammes, et susceptibles de produire pendant au moins deux heures un courant énergique.

341. Modèles divers de piles humides. — Nous avons déjà décrit la pile humide de Trouvé; d'autres modèles ont été imaginés qui répondent au même but : éviter l'emploi de substances à l'état liquide. C'est ainsi que M. Breton avait imaginé une pile où les électrodes étaient constituées par des limailles métalliques, zinc et cuivre, qui étaient mélangées à de la sciure de bois maintenue humide par l'addition de chlorure de calcium, substance très hygrométrique.

La pile à sciure de bois (Sawdust battery) de Sir W. Thomson est une pile de Daniell dans laquelle les liquides, au lieu d'être libres, imbibent une certaine quantité de sciure de bois.

Enfin, signalons la disposition générale adoptée par MM. Desruelles et Bourdoncle pour ramener à *l'état humide* une pile de nature quelconque : ils emploient de l'amiante qui s'imbibe avec une grande facilité et dont ils remplissent les vases où l'on doit verser les acides ou les dissolutions salines. L'amiante étant inattaquable peut être utilisée dans tous les cas : de plus son volume réel, effectif, est petit pour un volume apparent considérable. L'introduction de l'amiante ne diminue que peu la quantité de liquide à employer : aussi la résistance des éléments ainsi modifiés est-elle peu supérieure à celle des types ordinaires des mêmes éléments.

342. Piles sèches. — On désigne sous ce nom des piles qui fonctionnent sans l'intervention d'un liquide. On pensait autrefois que, conformément aux idées de Volta, le courant y était produit par le contact seul. En réalité, il s'y produit également des actions chimiques qui sont facilitées par ce que les substances employées ne sont jamais sèches, mais sont humides par le fait de l'humidité même de l'atmosphère : la preuve en est que ces piles ont un fonctionnement qui varie avec les différences qui se produisent dans l'état hygrométrique de l'atmosphère.

La seule pile sèche qui ait reçu effectivement quelques applications est celle de Zamboni. Elle se compose de disques empilés, comme dans la pile à colonne, et formant une série d'éléments dont la composition serait la suivante pour l'un d'eux :

Papier.
Bioxyde de manganèse.
Etain.

Comme il est arrivé pour la pile de Volta, la disposition qui avait d'abord été adoptée et que l'on a conservée ensuite à cause du moyen mécanique de fabrication semble donner à chaque élément la constitution suivante :

Étain.
Papier.
Bioxyde de manganèse.

Pour construire une pile sèche, on prend du papier étamé sur une face seulement ; sur l'autre face, on étend avec un pinceau une couche de bioxyde de manganèse délayé dans de l'eau ou dans du lait et que l'on fixe sur le papier avec un peu de colle d'amidon ou de gélatine. Lorsque l'enduit est sec, on empile un certain nombre de feuilles, 10 par exemple, en les disposant dans le même sens et, à l'aide d'un emporte-pièces, on y découpe des disques qui se trouvent ainsi réunis déjà par 10 ; on place les uns au-dessus des autres ces paquets de disques en observant toujours le même ordre. Lorsque l'on a réuni un nombre suffisant de disques (il doit toujours être très grand, 2 ou 300 au moins), on place aux extrémités de la colonne ainsi formée des disques métalliques munis d'appendices qui serviront de pôles et l'on comprime le tout à l'aide de fils de soie. On enduit généralement la surface du cylindre ainsi constitué d'une couche de soufre ou de gomme laque, qui a principalement pour effet de maintenir à peu près constante l'humidité du papier. Si celui-ci devient sec, en effet, la pile cesse de fonctionner.

D'après Delezenne, il y a dans cette pile oxydation de l'étain par l'action du bioxyde de manganèse ; c'est donc bien une pile à action chimique.

La force électromotrice de ces piles est assez considérable, par suite du grand nombre des éléments qui les constituent et que l'on peut augmenter beaucoup à cause du peu de place qu'ils occupent. Aussi l'électricité a-t-elle un potentiel appréciable aux extrémités et peut-il s'y produire des effets qui se rapprochent de ceux de l'électricité statique : attraction des corps légers, étincelles, etc.

Mais la résistance est considérable, aussi le courant produit a-t-il peu d'intensité et le débit est-il faible. Quand le temps est humide les tensions polaires s'affaiblissent, parce que la pile ne peut fournir à réparer les pertes par l'air.

Delezenne a observé qu'une pile de 300 couples rectangulaires, préparés comme il a été dit ci-dessus, et dont les dimensions étaient de 178 millimètres sur 158, donnait un courant assez intense pour

dévier notablement l'aiguille d'un galvanomètre (30°) et pour décomposer assez activement de l'eau salée.

La pile sèche a été utilisée dans l'électroscope de Bohnenberger, qui n'est plus employé, et dans le diagomètre de Rousseau. On peut s'en servir également dans l'électromètre de Mascart.

343. Piles secondaires Planté. — Les phénomènes de polarisation qui se produisent dans les liquides qui ont été soumis à l'électrolyse,

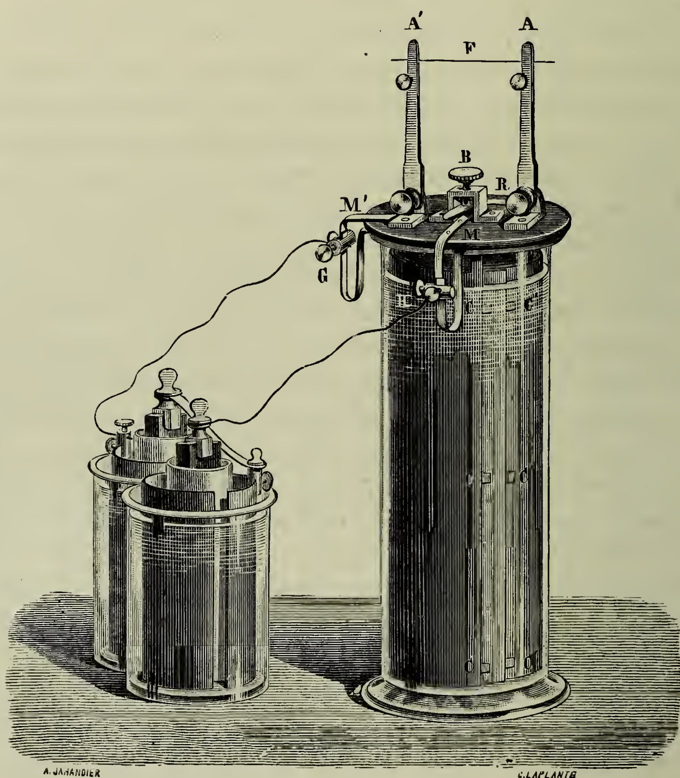


Fig. 240. — Élément secondaire Planté, en charge.

et qui avaient été signalés par Ritter (1806), ont été appliqués par M. Planté à la construction de piles qu'il a désignées sous le nom de *secondaires* et qui peuvent servir soit comme éléments isolés, soit réunis en nombres plus ou moins considérables.

Un élément secondaire est constitué par deux lames de plomb enroulées en spirale, comme dans les piles dites à hélice, et maintenues à distance par des rubans de caoutchouc. A chacune de ces

lames est adaptée une languette métallique qui permet d'établir les communications. L'ensemble de ces feuilles de plomb est plongé dans de l'eau acidulée par 1/10 d'acide sulfurique et renfermée dans un vase cylindrique, généralement en verre.

Cet élément est inactif par lui-même et il est nécessaire de le *former;* pour cela, on met chacune des feuilles de plomb en communication avec le pôle d'une pile (fig. 240) ou d'une machine produisant un courant continu : il se produit une action chimique par laquelle de l'hydrogène se dégage sur la lame qui correspond au pôle négatif de la pile; sur l'autre lame se porte l'oxygène qui, se combinant au plomb, forme une couche de peroxyde. Après un certain temps, on intervertit les communications de telle sorte que la lame sur laquelle se trouve l'oxyde soit reliée au pôle négatif de la pile. Ce sera donc sur cette lame que se portera l'hydrogène qui réduira l'oxyde en laissant le métal présentant une constitution particulière, une porosité notable qui est favorable à la condensation des gaz. Aussi, lorsque tout l'oxyde sera réduit, la décomposition continuant, l'hydrogène se condensera et le dégagement n'apparaîtra que lorsque le plomb sera saturé de gaz. Il y aura donc sur cette lame négative deux actions. Pendant qu'elles se produiront successivement, l'oxygène se sera porté d'une manière continue sur l'autre lame et aura formé sur toute sa surface une couche de peroxyde de plomb.

Si maintenant on rompt les communications avec la pile, l'élément secondaire est prêt à fonctionner, et si l'on vient à réunir par un fil les languettes fixées aux lames de plomb, ce fil sera traversé par un courant provenant de ce que l'hydrogène condensé à la surface de l'une des lames se combine à l'oxygène de l'oxyde qui se trouve sur l'autre lame. Lorsque cette action aura pris fin, le courant cessera et les deux lames de plomb se retrouveront libres d'hydrogène et d'oxyde, mais l'une et l'autre présentant cet état superficiel qui, par la suite, rendra plus facile la charge de l'élément secondaire en facilitant la condensation des gaz.

En réalité, après une seule opération, comme nous l'avons indiqué, l'élément peut bien donner un courant, mais sa durée est très faible, parce que la couche d'oxyde de plomb formée est de peu d'épaisseur et que l'action chimique est promptement épuisée. Aussi la *formation* de l'élément exige-t-elle un assez long temps pendant lequel on le fait traverser par le courant d'une pile ou d'une machine, alternativement dans un sens et dans l'autre. Le passage d'un courant détruit ainsi l'effet du courant précédent; mais à chaque fois, l'é-

paisseur de l'oxyde augmente, en même temps qu'augmente sur l'autre face l'épaisseur de plomb poreux, ce qui permet d'accroître la quantité de gaz qui s'y condensera dans l'opération suivante.

Cette opération de la formation d'un élément Planté dure longtemps, plusieurs mois quelquefois, mais lorsqu'elle est complète, on peut en chargeant l'élément y accumuler de grandes quantités d'oxygène d'une part et d'hydrogène d'autre part; par suite, cet élément, lorqu'il fonctionnera, pourra donner naissance à un courant d'une assez grande durée. M. Planté a indiqué un moyen de hâter cette formation en plongeant, avant tout passage du courant, les lames de plomb dans de l'acide azotique étendu de moitié de son volume d'eau et les y laissant pendant vingt-quatre heures. Il se produit un décapage qui agit favorablement. Un élément secondaire ainsi préparé peut donner en huit jours, après trois ou quatre interversions du courant, des effets que sans le décapage l'on ne pourrait obtenir qu'en plusieurs mois.

344. Batterie d'éléments Planté. — Un seul élément Planté, dont la force électromotrice est d'environ 2, 1 volts, peut donner un cou-

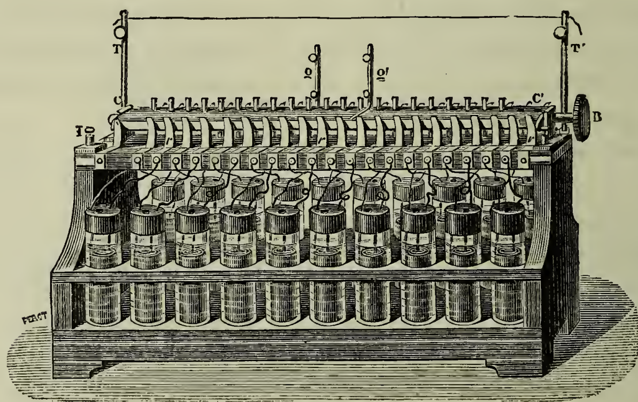


Fig. 241. — Batterie secondaire Planté.

rant assez intense pour rougir un fil de platine. Mais on a souvent intérêt à obtenir des effets plus énergiques et on les obtient en employant des piles en batteries, formées en accouplant des éléments Planté.

Afin d'obtenir des effets correspondant à une grande force électromotrice, il faut disposer ces éléments en série ou en tension. Mais pour les charger il est préférable de les grouper parallèlement ou en quantité, parce que la résistance opposée à la source d'électri-

cité sera moins grande. Pour passer facilement et rapidement de l'une des dispositions à l'autre, M. Planté emploie un commutateur spécial qui est absolument analogue à celui que nous avons décrit dans la machine rhéostatique et qui agit d'une façon identique, si ce n'est qu'on le fait tourner de 90° au commencement de chaque opération seulement.

345. Accumulateurs : accumulateurs Faure. — C'est sur le principe des piles secondaires que sont fondés les appareils divers usités maintenant sous le nom d'*accumulateurs*, nom moins exact que celui de pile secondaire, car on n'accumule pas l'électricité (on l'accumule dans les condensateurs, la bouteille de Leyde), mais on produit une véritable pile, qui donne naissance au courant par suite des réactions chimiques qui se produisent alors.

L'accumulateur Faure a subi diverses modifications de forme : nous décrirons seulement le dernier modèle.

Les deux plaques de plomb formant les éléments d'un accumulateur sont coulées sous forme d'un grillage à jour : dans l'électrode positive, les espaces vides sont remplis par du minium qui, sous l'influence du courant de charge, se transforme en peroxyde de plomb ; à l'électrode négative, ces espaces sont remplis par de la litharge qui, dans l'acte même de formation de la pile, est réduite en plomb spongieux. Ces lames sont maintenues à distance, isolées les unes des autres par des bandelettes de caoutchouc dont l'épaisseur est déterminée par la distance qui doit séparer deux électrodes consécutives.

Cette dernière disposition a supprimé les enveloppes de feutre qui entouraient les lames de plomb : elles avaient le double inconvénient d'accroître la résistance de la pile et de se détériorer assez rapidement.

La durée des lames négatives paraît être très considérable, on a même dit indéfinie ; il n'en est pas de même des lames positives dans lesquelles le plomb s'oxyde progressivement, de telle sorte que la carcasse de l'électrode se détruit. On ne sait pas au juste après combien de temps d'usage ces lames doivent être changées.

On aura une idée de ce que peuvent fournir ces accumulateurs par les chiffres suivants : un accumulateur composé de 43 lames et pesant 140 kilogrammes a fourni un courant de 120 ampères pendant 6 heures.

346. Accumulateurs gaufrés de M. de Kabath. — Il est évidemment intéressant et nécessaire, même au point de vue des applications pratiques et industrielles, de construire des accumulateurs

aussi légers que possible, pour une puissance donnée d'emmagasinement. Il faut pour cela augmenter la surface active sans accroître la masse, car les actions chimiques sont des actions superficielles. Guidé par cette idée, M. de Kabath a disposé les lames métalliques comme suit.

La pile se compose d'une série de lames verticales placées parallèlement : chaque lame est elle-même composée d'une série de lanières de plomb de $0^{mm},1$ d'épaisseur, alternativement gaufrées et plates, placées parallèlement; ces lanières ont de $0^{m},08$ à $0^{m},09$ de largeur et sont réunies au nombre de 100 environ par une lame de plomb percée de trous en quinconces qui les enveloppe tout en permettant la libre circulation du liquide; à chaque lame composée ainsi construite est fixée une tige conductrice qui sert à la relier à la borne correspondante. Ces lames d'une hauteur de $0^{m},40$ sont placées parallèlement au nombre de 12, et reliées alternativement à l'une et à l'autre borne : deux lames extrêmes, simples feuilles de plomb, complètent la série qui est placée dans un récipient en bois doublé de plomb et muni d'anses permettant de le manœuvrer aisément. Cet accumulateur pèse 30 kilogrammes vide, et 35 kilogrammes lorsqu'il est rempli d'eau acidulée au dixième.

Il existe également un modèle horizontal, sur lequel il n'est pas nécessaire d'insister.

347. Piles thermo-électriques. — Les piles thermo-électriques sont utilisées soit pour fournir un courant électrique sous l'action de la chaleur, soit pour reconnaître l'existence d'une différence de température par la production d'un courant : c'est au premier point de vue que nous avons seulement à les considérer ici; nous nous occuperons ultérieurement de la pile thermo-électrique comme thermomètre différentiel.

Des piles de divers modèles ont été imaginées qui ne différaient que par la nature des métaux employés; mais il n'en est guère qui soient restées dans la pratique. Au bout d'un certain temps, le courant que ces piles peuvent donner s'affaiblit considérablement. Cet effet tient vraisemblablement à ce que, sous l'influence de la chaleur, les soudures qui existent entre les métaux hétérogènes cessent d'être aussi parfaites et qu'il se produit de légères couches d'oxyde : la résistance se trouve ainsi considérablement augmentée, ce qui explique l'affaiblissement du courant. Cette détérioration des éléments se continue et amène la destruction de la pile.

Nous parlerons seulement de la pile de Noé, qui est la seule qui paraisse résister à l'usage.

Dans cette pile (fig. 242), les substances en présence sont, d'une part, un alliage à base d'antimoine et, de l'autre, le maillechort : mais ce qui la distingue, c'est la manière dont se fait la réunion des métaux et le chauffage des soudures.

L'antimoine est disposé en forme de barreaux cylindriques placés horizontalement : quelquefois ils sont parallèles, mais le plus souvent ils sont disposés circulairement au nombre de 12 ou 20, de manière à avoir une direction radiale. Le maillechort se présente sous la forme de quatre fils groupés qui sont soudés à l'extrémité

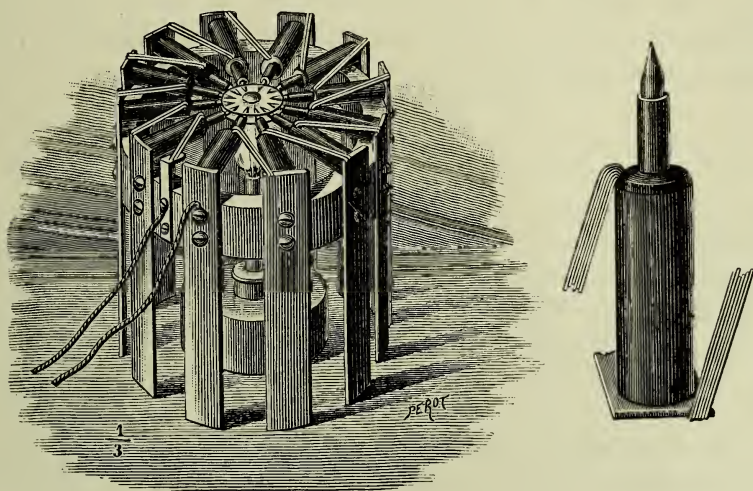


Fig. 242. — Pile thermo-électrique de Noé. (*Bréguet.*)

centrale de l'un des barreaux et à l'extrémité périphérique du barreau voisin. Cette dernière soudure qui ne doit pas être échauffée, ne présente rien de particulier, mais afin de diminuer autant que possible son élévation de température, on y soude également des lames métalliques de grande surface, souvent recourbées en cylindres verticaux de manière à augmenter les causes de refroidissement : ces lames peuvent même être plongées dans l'eau.

Les soudures centrales présentent une disposition particulière : chacune d'elles est formée par une calotte de laiton dans laquelle viennent aboutir, d'une part, les fils de maillechort et, d'autre part, un cylindre de cuivre qui forme comme un prolongement aminci du barreau même. Dans cette calotte, on coule le métal qui constitue le barreau, de telle sorte que le contact des métaux actifs se fait direc-

tement et sans l'interposition de soudure; en même temps la calotte de cuivre soustrait les surfaces en contact à l'action de l'air. Enfin, ajoutons que les flammes n'agissent pas directement sur ces soudures : elles échauffent seulement les extrémités des barreaux de cuivre, et la température des soudures s'élève par suite de la conductibilité calorifique du cuivre.

La force électromotrice dépend naturellement de la température à laquelle on porte la partie centrale; pour une température qui n'amène pas les extrémités des goupilles de cuivre à la température rouge, la force électromotrice d'un élément serait de $\frac{1}{16}$ d'un Daniell, soit environ 0, 06 volt. La résistance d'un élément ordinaire serait de 0, 026 ohm.

CHAPITRE VII

MACHINES D'INDUCTION

348. — Les appareils d'induction, surtout les appareils magnéto et dynamo-électriques, prennent une importance de plus en plus considérable dans les applications de l'électricité. Aussi, comme il arrive toujours, est-on conduit à adopter les machines en vue de conditions spéciales, et ne saurait-on concevoir un appareil qui servirait également bien dans tous les cas.

Ces appareils ainsi spécialisés et auxquels on demande suivant les cas des services très différents (applications à la physiologie et à la médecine, à la galvanoplastie, à l'éclairage électrique, à la transmission du travail mécanique, etc.) seront décrits dans la suite de cet ouvrage. Nous nous bornerons ici à signaler avec quelques détails les instruments utilisés dans les laboratoires et qui sont, au moins en France, la bobine de Ruhmkorff, et les machines de Clarke et de Gramme.

349. Bobine de Ruhmkorff. — Nous avons donné (198) la théorie générale de la bobine de Ruhmkorff, dans laquelle il y a à considérer trois éléments principaux : le circuit inducteur, l'interrupteur et le circuit induit. Laissant de côté les détails que l'on rencontre dans les bobines, tels que les commutateurs dont nous avons déjà parlé, nous étudierons successivement ces diverses parties.

Le fil inducteur fait nécessairement partie d'un circuit comprenant une pile. La puissance de cette pile dépend de la grandeur des effets à produire et de la disposition de l'appareil ; la pile est tantôt formée par deux éléments, au sulfate de mercure, de Gaiffe, et tantôt par douze éléments Bunsen, éléments plats et à grande surface :

chaque bobine est construite pour fonctionner le mieux avec un courant déterminé.

Le courant inducteur dans la bobine agit à la fois et par sa longueur et par son intensité. La longueur est celle du fil inducteur; l'intensité, pour une pile donnée, dépend de la résistance de ce fil. Si l'on augmente la longueur on augmente en même temps la résistance et, par suite, on diminue l'intensité : on peut bien, il est vrai, obvier à cet inconvénient en prenant des fils d'un plus grand diamètre; mais, en réalité, la question est complexe, car il faut tenir compte de la distance à laquelle les spires inductrices sont des spires induites, l'action diminuant quand la distance augmente. On conçoit que l'augmentation de longueur, l'augmentation de diamètre aient pour effet de réduire l'action des couches les plus externes du circuit inducteur et qu'il y a une limite que l'on ne peut dépasser sans perdre au moins autant que l'on ne gagne. A défaut d'une théorie complète, l'expérience précise les dimensions à adopter.

L'effet inducteur dépend de l'état variable qui se produit dans le circuit de la pile au moment où le courant s'établit et au moment où il cesse : la différence de potentiel qui s'établira aux deux extrémités du fil induit, et d'où dépend la grandeur des effets produits, est liée à la durée de cet état variable et croît quand cette durée diminue : il faut donc éviter toutes les causes qui tendent à allonger la période de l'état variable. Parmi ces causes, il y a lieu de considérer les extra-courants qui se produisent dans le circuit inducteur, extra-courants qui augmentent la période d'état variable initial et font que les courants induits qui se produisent à l'établissement du courant, correspondent toujours à une moindre différence de potentiel que ceux qui se produisent lors de la rupture.

A la rupture, les étincelles qui se produisent à l'interrupteur, par suite de l'existence de l'extra-courant, sont plus énergiques que celles qui seraient données par la pile seule : outre que les conducteurs risquent de se détériorer, cette augmentation d'étendue de l'étincelle prolonge la durée du courant, qui ne cesse qu'avec l'étincelle même. Il y a donc, non pas interruption brusque, mais diminution d'intensité du courant inducteur avant la cessation : l'étincelle est une prolongation du courant, mais correspondant à une très grande résistance. Outre que l'action inductrice du courant doit alors être moins énergique, il faut remarquer que, en même temps, la désaimantation du faisceau central de fer doux est aussi moins brusque; comme son action est semblable à celle du

circuit inducteur, on comprend que l'action inductrice diminue.

M. Fizeau a montré en 1853 que l'on évite ces inconvénients, qu'on les diminue au moins, en mettant deux points du circuit A, B (fig. 243) pris de part et d'autre de l'interrupteur DE en communication avec les deux armatures C, C′ d'un condensateur. Les étincelles qui apparaissent à l'interrupteur sont moins considérables et les effets induits sont plus intenses.

Voici comme il nous semble que l'on peut s'expliquer ces effets : à la fermeture du circuit, d'abord, alors que le marteau E viendra

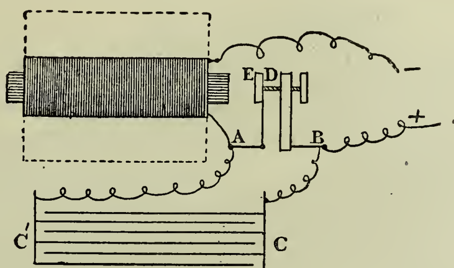


Fig. 243.

en contact avec D, avant que le régime permanent se soit établi dans le circuit, le condensateur devra se charger; la capacité du circuit inducteur sera plus grande que si le condensateur n'existait pas, la période variable sera donc plus longue, et comme rien ne sera changé à la valeur finale du courant, le courant induit diminuera d'intensité.

Supposons, au contraire, le régime permanent établi et considérons le moment où le marteau E s'écartera de la pointe D ; les deux lames du condensateur sont à un potentiel peu différent, puisqu'elles sont en communication par la série non interrompue des conducteurs B,D,E,A; dès qu'il se produit une interruption en DE, le condensateur tend à se charger davantage; c'est sur ses lames et non en DE que s'accumule l'électricité, d'une part, ce qui diminue les étincelles; puis, d'autre part, le condensateur se décharge par le circuit de B vers A en passant par la pile et la bobine, ce qui établit un courant en sens contraire de l'extra-courant et du courant de la pile, diminue encore l'étincelle de rupture et hâte la désaimantation du fer doux ; ces actions rapprochent donc la période variable de la durée qu'elle devrait avoir s'il n'y avait pas d'extra-courant et augmentent l'intensité du courant induit de rupture.

Quoi qu'il en soit de l'explication, sur laquelle on n'est pas encore parvenu à s'entendre, le fait est incontestable et l'avantage de l'emploi d'un condensateur n'est pas douteux. Aussi, dans les bobines de dimensions un peu considérables place-t-on toujours un condensateur C (fig. 244) dont les armatures O, O′ sont reliées respectivement aux bornes situées de part et d'autre de l'interrupteur E E′ V. Tantôt ce condensateur est formé de lames d'étain séparées par des feuilles de mica ou seulement de papier paraffiné, tantôt il est con-

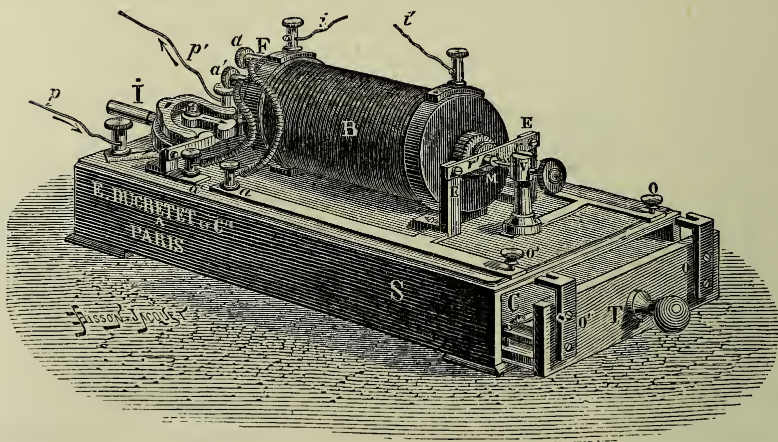


Fig. 244. — Bobine d'induction. (*Ducretet.*)

stitué par une longue bande de taffetas sur les deux faces de laquelle on a collé des feuilles d'étain présentant une grande surface : une autre bande de taffetas est placée de part et d'autre et le tout est replié de manière à entrer dans le socle qui sert de support à la bobine.

Comme nous l'avons dit plus haut, le fer doux qui est au centre de la bobine agit également comme inducteur par son aimantation et par sa désaimantation. On a reconnu qu'il y a intérêt, à ce point de vue, à employer non un barreau unique, mais un faisceau formé par juxtaposition de fils de fer doux séparés les uns des autres : les variations magnétiques sont alors plus rapides. Il n'est pas nécessaire de séparer les fils les uns des autres à l'avance, la couche d'oxyde qui se forme toujours en très peu de temps constitue un isolant suffisant.

Dans quelques cas, le circuit inducteur peut être réuni par des conducteurs à des points entre lesquels on veut faire agir l'extra-

courant : cette disposition se retrouve notamment dans les appareils médicaux.

350. — Le courant induit qui se produit pour un courant inducteur donné, présentant des périodes déterminées d'état variable, dépend des conditions du circuit induit : la quantité d'électricité est proportionnelle à la résistance de ce circuit induit. Cet élément ne suffit pas pour déterminer la grandeur des effets produits; mais on peut en déduire que la force électro-motrice mise en jeu dans la bobine est proportionnelle au carré de cette résistance et en raison inverse de la durée du courant produit[1].

Il y a donc intérêt à augmenter la longueur et à diminuer la section du fil induit; mais il y a d'autre part une limite, car si la résistance de chaque spire est trop considérable, c'est-à-dire si le fil est trop fin, il y aura un échauffement capable de détériorer les couches isolantes qui séparent les diverses spires.

Dans les bobines qui avaient été primitivement construites, l'enroulement du fil induit se commençait à une extrémité de la bobine pour se continuer jusqu'à l'autre extrémité, puis, dans la couche suivante, l'enroulement se continuant, le fil revenait à son point de départ; à cet endroit, s'il y avait n spires par couche et si le rayon moyen était a, la longueur du fil qui séparait ces deux points était $2 \times n \times 2\pi a$ et pouvait avoir une valeur considérable, c'est-à-dire que la différence de potentiel entre ces deux points était fort grande. Poggendorff signala cet inconvénient, qui pouvait amener des étincelles entre deux couches superposées et, par suite, une détérioration des enveloppes isolantes : il indiqua qu'il y aurait intérêt à modifier ce mode de construction en employant des bobines de moindre longueur, mais en en multipliant le nombre. On a satisfait

1. Soit r la résistance du circuit induit, e la force électromotrice, i l'intensité du courant, t sa durée, q la quantité d'électricité correspondante; on a :

$$q = it$$

et

$$i = \frac{e}{r}.$$

Mais on a d'autre part $q = \mathrm{KI}r$, I étant l'intensité du courant inducteur et K une constante qui dépend de l'appareil; on aura donc

$$\frac{et}{r} = \mathrm{KI}r$$

d'où l'on déduit

$$e = \frac{\mathrm{KI}r^2}{t}.$$

pratiquement à cette condition par l'emploi des bobines cloisonnées : la bobine est partagée dans le sens de sa longueur par un certain nombre de cloisons isolantes, des lames de glace, par exemple, placées transversalement. Entre deux cloisons consécutives on enroule le fil suivant la méthode ordinaire, seulement la longueur du fil qui correspond à deux couches superposées est nécessairement beaucoup moindre que dans le cas d'une bobine unique. On enroule dans chaque fraction un nombre impair de couches, de manière que le fil qui commence à une extrémité, à gauche par exemple, sorte à l'autre extrémité à la périphérie ; dans la fraction suivante, l'enroulement se fait inversement, de sorte que l'extrémité périphérique soit à gauche et l'extrémité centrale à droite. On peut alors aisément réunir les fils des deux fractions voisines et constituer une bobine induite unique, ne présentant en aucun point une grande différence de potentiel entre deux points voisins.

En général, pour les bobines de grandes dimensions, les seules pour lesquelles cette disposition présente un intérêt réel, on ne voit pas le cloisonnement, parce que la bobine est recouverte dans toute son étendue par une enveloppe isolante, en ébonite, par exemple.

Les dimensions du fil inducteur dépendent nécessairement des effets que l'on veut obtenir et varient considérablement, de même que celles du fil induit avec lesquelles elles doivent être dans une certaine relation : nous nous bornerons à dire que les diamètres sont uniformément de $0^{mm},16$ pour l'induit et varient de $1^{mm},5$ à 2^{mm} pour l'inducteur; les longueurs pour les modèles ordinaires variant de 1000 à 18000^{m} pour l'induit et de 6 à 35^{m} pour l'inducteur.

351. Interrupteurs Marcel Deprez. — Dans quelques recherches sur l'induction, on a employé comme interrupteur le rhéotrope ou roue de Masson. Pour certaines expériences de physiologie principalement, on fait usage d'interrupteurs mus mécaniquement et donnant lieu à des interruptions rythmées et dont les intervalles sont fixés à l'avance; nous les décrirons ultérieurement. Quelquefois enfin on produit les contacts et les interruptions directement à la main; cette disposition se rencontre, au moins facultativement, dans des appareils médicaux. Mais presque toujours on a recours à des interrupteurs dérivés soit du trembleur de Neef, soit de l'interrupteur de Foucault.

Nous avons indiqué, d'une manière suffisante pour que le fonctionnement puisse en être compris, le trembleur à marteau et le trembleur à ressort; aussi n'aurions-nous rien à ajouter si nous ne voulions signaler un perfectionnement indiqué simultanément par

M. Ducretet et M. Marcel Deprez; nous décrirons la disposition indiquée par ce dernier.

Dans le trembleur ordinaire, la pièce mobile est attirée et le courant inducteur interrompu dès que l'attraction produite par le fer doux aimanté est suffisante pour vaincre le poids du marteau ou la tension du ressort. Or, il est possible que cet effet se produise avant la fin de la période variable du courant inducteur, avant que celui-ci, par conséquent, ait atteint son intensité maxima, et dès lors le courant induit produit ne sera pas aussi intense que pourrait le donner le courant inducteur. M. Marcel Deprez a obvié à cet inconvénient en disposant l'interrupteur à ressort de manière que la force

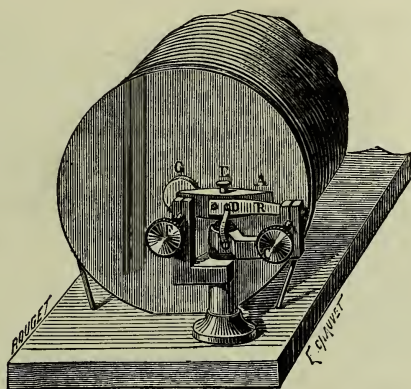


Fig. 245. — Interrupteur Marcel Deprez. (*Carpentier.*)

antagoniste que l'attraction du fer doux aimanté a à vaincre puisse être modifiée entre certaines limites. On tend le ressort antagoniste jusqu'à ce que l'attraction ne puisse se produire ; la bobine ne fonctionne pas alors ; on détend ce ressort peu à peu, jusqu'à ce que le trembleur entre en action. On est bien assuré alors que l'attraction ne se produisant que lorsque le courant inducteur a atteint son maximum d'intensité, il a produit aussi son maximum d'effet sur la bobine induite.

De plus, il faut que le courant puisse être rétabli le plus tôt possible après sa rupture, parce que l'état variable de rupture a une durée très courte : elle est bien moindre que la durée de l'état variable de fermeture. Il convient donc d'éviter les pièces portées sur des ressorts assez longs, dont la durée de vibration dépend de leur élasticité et est beaucoup plus considérable qu'il ne faut. Dans l'interrupteur de Marcel Deprez, la pièce mobile A tourne au-

tour d'une broche rigide E : un ressort R tend à l'appuyer sur la pointe de la vis F. Dans ce cas, le courant passe; comme dans toutes les bobines, il cesse dès que la pièce A attirée par le fer doux G quitte cette vis. Aussitôt que l'attraction a cessé, la pièce A revient au contact avec la vis F dont elle ne s'écarte que très peu; ce retour est très rapide parce qu'il n'y a pas vibration de A.

352. Interrupteur Foucault. — Dans l'interrupteur Foucault, ce n'est pas le courant inducteur, c'est le courant d'une pile locale qui assure les interruptions dont on peut faire varier le rythme et

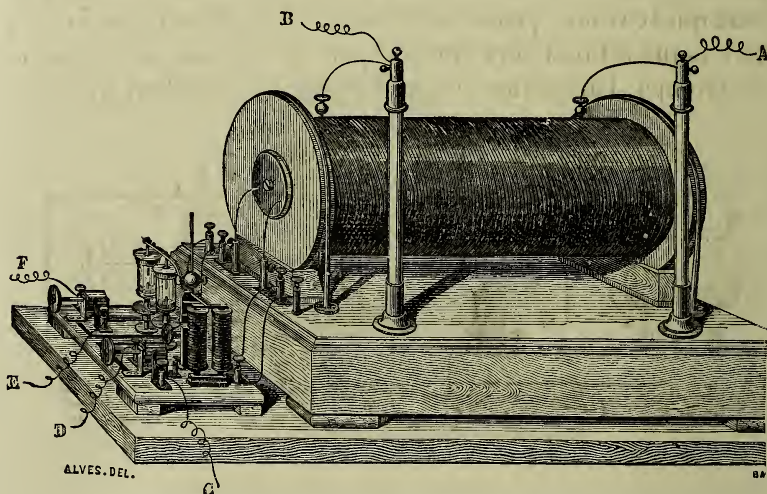


Fig. 246 — Bobine de Ruhmkorff avec interrupteur Foucault. (*Ducretet.*)

les conditions entre certaines limites. De plus, et c'est là ce qui caractérise spécialement cet interrupteur, les conducteurs entre lesquels se fait la rupture du courant inducteur ne sont plus deux pièces métalliques qui viennent au contact.

Entre ces pièces métalliques il se produit, nous l'avons dit, des étincelles d'extra-courant, à la rupture. Ces étincelles prolongent la période de l'état variable, détériorent les surfaces en contact, et on a pu observer dans certaines bobines puissantes des traces de fusion et même la soudure des pièces. Dans l'interrupteur Foucault (fig. 246) le contact est établi par une pointe qui vient plonger dans un godet de mercure et qui en se relevant produit la rupture. Mais à la rupture, il y a prolongement de l'état variable, par suite de la vaporisation d'une petite quantité de mercure, si le mouvement se passe dans l'air : il n'en est plus ainsi si le mercure est recouvert par une

couche d'alcool ; l'étincelle de rupture est devenue très brève, la période variable est donc raccourcie.

Le mercure est attaqué dans ces conditions également, et l'on s'en aperçoit rapidement, car l'alcool se trouble et se colore ; mais cela ne gêne en rien le fonctionnement de l'appareil.

L'interrupteur est constitué essentiellement par une tige verticale à ressort MN (fig. 247) qui oscille dans un plan vertical ; la durée de cette oscillation peut être modifiée par le déplacement d'un contrepoids C que l'on fixe à différentes hauteurs à l'aide d'une vis de pression. Cette tige verticale porte, à mi-hauteur environ, une branche horizontale qui, à une extrémité, est terminée par une traverse K de fer doux qui se trouve placée au-dessus d'un électro-aimant et sera attirée lorsque celui-ci sera traversé par un courant ; si le courant est interrompu, l'attraction cesse et le système oscillant qui avait

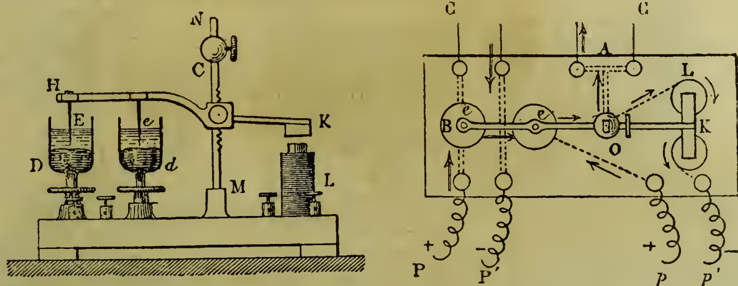


Fig. 247. — Interrupteur Foucault.

dévié de sa position d'équilibre y revient par suite de l'élasticité de la tige verticale et dépasse même cette position par sa vitesse acquise.

Du côté opposé à la traverse de fer doux, la branche horizontale porte deux pointes de fer E, *e* qui lui sont perpendiculaires et dont chacune se meut dans un godet contenant du mercure recouvert d'une couche d'alcool. Considérons d'abord un de ces godets seulement : le mercure est relié à l'un des pôles d'une pile, tandis que la traverse est reliée à l'autre pôle, plus ou moins directement. Quand l'interrupteur est au repos, la pointe ne pénètre pas dans le mercure, le courant ne passe pas. Mais si on vient à provoquer des oscillations, la pointe, alternativement, entrera dans le mercure et en sortira ; tantôt par conséquent le courant passera, tantôt il sera interrompu. Les godets peuvent d'ailleurs être plus ou moins élevés, de manière à limiter la durée du passage du courant.

Le pôle — de la pile locale, un ou deux éléments Bunsen, commu-

nique avec l'électro-aimant et de là, par la tige verticale et la branche horizontale, à l'une des pointes, tandis que l'autre pôle communique avec le mercure : il est facile de voir que le courant passera quand le système oscillant sera à une extrémité de sa course et que l'action de l'électro-aimant sera de l'en écarter pour le ramener à l'autre extrémité; mais alors la pointe *e* se soulèvera, le courant sera interrompu, l'électro-aimant L cessera d'agir et le système tendra à revenir à sa position première en vertu de son élasticité, et ainsi de suite. Le mouvement régulier de l'interrupteur sera donc ainsi assuré.

Quant à la pile qui fournit le courant inducteur, l'un de ses pôles communique avec le mercure du second godet D, l'autre avec l'une des extrémités du fil inducteur, tandis que la seconde extrémité de ce dernier fil est reliée avec la tige verticale et par là avec la seconde pointe : le courant inducteur passera toutes les fois que cette pointe plongera dans le mercure et sera interrompu quand elle en sortira; ces mouvements sont assurés par l'oscillation du système complet. Il y a également par C, C des communications avec les armatures du condensateur.

L'appareil fonctionne très bien : il existe cependant, dans la disposition adoptée, des dérivations de l'un des circuits dans l'autre, dérivations sans utilité et qu'il serait aisé et avantageux de faire disparaître.

Au début, Foucault avait employé un commutateur simple à mercure dans lequel les interruptions se produisaient à la surface d'un bain de mercure, mais où le mouvement de la tige plongeante était entretenu comme l'est le mouvement de l'interrupteur à marteau. Cette disposition, légèrement modifiée, se retrouve dans divers modèles (fig. 248).

353. Inégalité des courants induits. — Il résulte de la cause même du développement des courants induits que si l'on considère une bobine dans laquelle le circuit induit est complet, ce circuit sera traversé par des courants alternativement directs et inverses. Ces courants successifs correspondent à des quantités égales d'électricité; mais ils n'ont pas la même intensité, parce qu'ils n'ont pas la même durée, c'est-à-dire que la force électromotrice n'a pas la même valeur : le courant inverse qui correspond à la fermeture du circuit inducteur a une intensité moindre, correspond à une force électromotrice moindre que le courant direct qui se produit lors de la rupture du circuit inducteur.

Si l'on fait passer la succession des courants induits dans un

électrolyte, on n'observera aucun effet, s'il s'agit de décomposer un sel dans lequel plongent deux lames du même métal, chaque courant détruisant absolument l'effet du courant précédent; s'il s'agit de la décomposition de l'eau acidulée (132) dans un voltamètre, les décompositions se feront alternativement d'une façon opposée et l'on recueillera un mélange d'oxygène et d'hydrogène dans chaque éprouvette.

L'effet sur un galvanomètre sera nul parce que la durée des courants est trop petite par rapport à celle des oscillations de l'aiguille; l'impulsion communiquée par la force est trop minime.

Les courants fournis par la bobine d'induction, sauf leur alter-

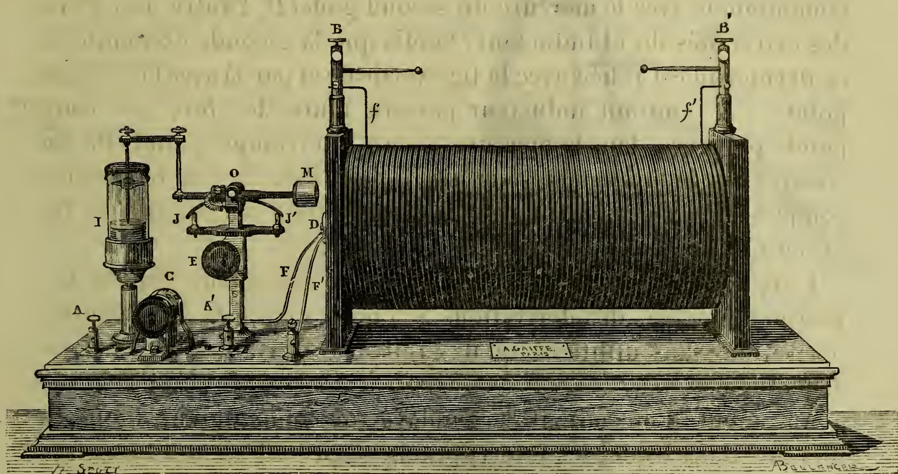


Fig. 248. — Bobine de Ruhmkorff avec interrupteur simple à mercure. (*Gaiffe.*)

nance et leur courte durée, obéissent aux lois générales des courants et produisent les mêmes effets. On l'a prouvé en les étudiant à l'aide du rhéotrope (193) qui servait à interrompre l'inducteur : un second rhéotrope monté sur le même axe et dont la disposition est facile à concevoir ne laissait passer que les courants directs ou que les courants inverses. On peut même imaginer qu'à l'aide d'une roue du même genre on puisse redresser les courants alternatifs et obtenir dans un conducteur des courants successifs toujours de même sens.

En ce qui concerne les effets calorifiques, qui sont très marqués, cette précaution est inutile, parce que la quantité de chaleur dégagée est indépendante du sens du courant.

354. — Les phénomènes sont différents si le circuit qui est traversé par les courants induits présente une solution de continuité :

des étincelles, qui paraissent presque continues si l'interrupteur marche assez rapidement, jaillissent entre les deux pointes et un galvanomètre ou un voltamètre placé dans le circuit indique que le courant direct passe seul, le courant qui correspond à la rupture du courant inducteur. Cela tient à ce que la force électromotrice correspondante au courant inverse, force électromotrice qui est la plus faible, n'est pas suffisante pour vaincre la résistance opposée par l'air, tandis que la force électromotrice directe a une assez grande valeur pour produire cet effet.

355. Machine de Clarke. — Nous avons donné le principe de cette

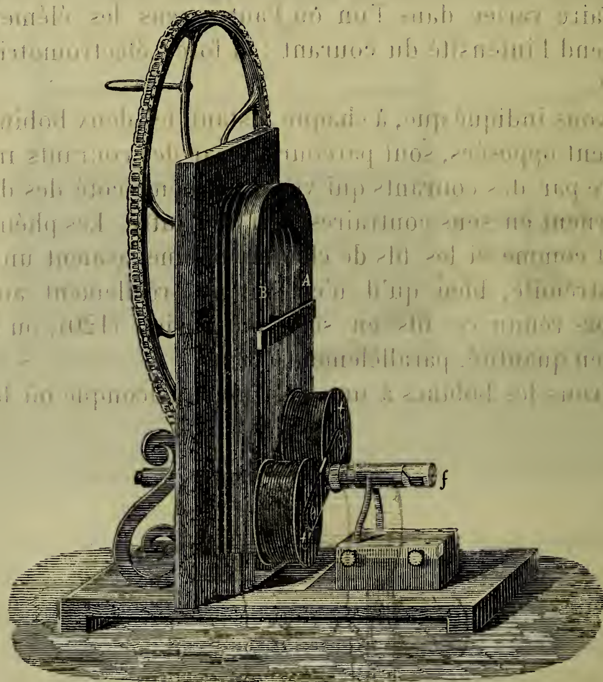


Fig. 249. — Machine de Clarke. (*Carpentier.*)

machine et indiqué sa disposition générale : il nous reste seulement à signaler quelques détails.

L'aimant en fer à cheval porté sur un support vertical est généralement formé de lames superposées : entre ses deux branches et à la hauteur des pôles, le support est traversé par un axe horizontal auquel un rapide mouvement de rotation est communiqué par l'intermédiaire de roues dentées et d'une chaîne sans fin ; la manivelle motrice est mue à la main.

Suivant les effets que l'on recherche, on emploie des bobines de nature différente, soit à fils fins, soit à fils gros. Ces bobines sont fixées à une traverse placée perpendiculairement à l'axe de rotation qui les entraîne dans son mouvement. Enfin, le même axe porte le collecteur ou commutateur du courant.

Les bobines sont à fils fins et longs si l'on désire obtenir une force électromotrice considérable, une grande tension ; elles sont à fils gros et relativement courts si l'on cherche surtout à obtenir une grande quantité d'électricité.

On peut d'ailleurs modifier l'accouplement des bobines, de manière à faire varier dans l'un ou l'autre sens les éléments desquels dépend l'intensité du courant : la force électromotrice et la résistance.

Nous avons indiqué que, à chaque instant, les deux bobines, diamétralement opposées, sont parcourues par des courants inverses, c'est-à-dire par des courants qui vus d'un même côté des deux bobines tournent en sens contraires l'un de l'autre. Les phénomènes se passent comme si les fils de chaque bobine avaient un pôle à chaque extrémité, bien qu'il n'en soit pas réellement ainsi. On pourra alors réunir ces fils en série ou tension (120), ou bien au contraire en quantité, parallèlement (122).

Considérons les bobines à une position quelconque où les cou-

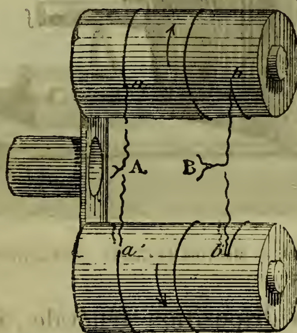


Fig. 250.

rants ont le sens indiqué par la figure 250 ; tout se passe alors, si les bobines ont les fils enroulés de cette façon, comme s'il y avait en a et a' des pôles + et en b et b' des pôles —. Si alors nous réunissons a et a' d'une part, b et b' d'autre part, nous aurons en A et B des pôles + et — qui présenteront une différence de potentiel égale à celle qui

correspond à une bobine ; la résistance entre ces deux points sera la moitié de celle de l'une des bobines.

Dans le cas que nous venons d'indiquer, il était commode que les fils fussent enroulés, l'un dextrorsum, l'autre sinistrorsum.

Supposons maintenant que les deux fils soient enroulés dans le même sens, comme dans la figure 251 ; alors les deux pôles voisins a et b' d'une part, et a' et b d'autre part, ont des signes contraires. Si nous réunissons b à a', les fils A et B fixés en a et b' présenteront

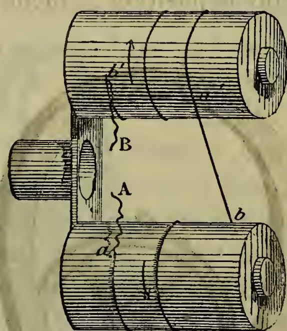


Fig. 251.

une différence de potentiel égale à deux fois celle qui correspond à une bobine, et la résistance entre ces deux points sera aussi égale au double de la résistance d'une bobine.

On choisira la disposition qui conviendra le mieux au but que l'on se propose d'atteindre.

Les courants produits dans les bobines peuvent, dans tous les cas, être recueillis dans un circuit extérieur que l'on fera communiquer avec A et avec B ; mais comme ces fils tournent avec les bobines, les communications devront s'établir par l'intermédiaire de frottoirs qui s'appuient sur une pièce mobile avec les bobines. On peut se proposer, ou de recueillir les courants tels qu'ils se produisent, c'est-à-dire alternatifs, ou au contraire de les redresser, c'est-à-dire de faire qu'ils aient toujours le même sens dans le circuit extérieur. Dans le premier cas on emploie un *collecteur*, dans le second un *commutateur* ou *redresseur*. Nous avons donné (199) la disposition générale des appareils de ce genre : il est inutile d'insister sur des dispositions de détail qui se comprennent aisément et qui se modifient quelque peu suivant les constructeurs.

Dans quelques cas on emploie une disposition spéciale qui permet

d'obtenir des courants avec interruption brusque, pouvant donner d'énergiques secousses.

356. Machine Gramme. — Nous avons donné l'explication du fonctionnement de la machine Gramme, que nous devons maintenant décrire avec quelques détails.

L'appareil se compose en somme d'une série de bobines de fils enroulés séparément autour d'un anneau de fer doux mobile autour d'un axe perpendiculaire à son plan dans un champ magnétique varié; chaque bobine est traversée par un courant dont l'intensité et le sens varient suivant la position actuelle de la bobine; toutes

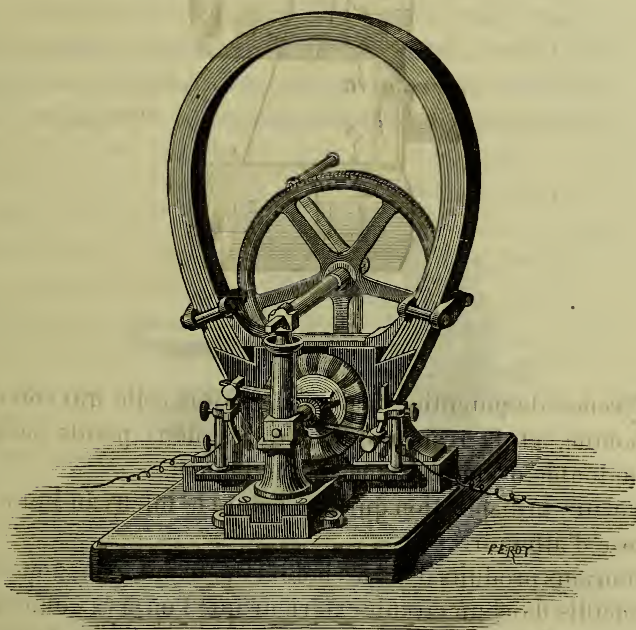


Fig. 252. — Machine Gramme. (*Bréguet.*)

les bobines situées d'un même côté d'une ligne fixe sont traversées par un courant de même sens, le sens est inversé pour les bobines situées de l'autre côté. On conçoit que ces courants correspondent à des différences de potentiel qui se manifestent entre les extrémités du fil de chaque bobine : on pourrait donc les réunir de diverses façons pour obtenir un courant dans un circuit extérieur. Dans la machine Gramme, les connexions sont établies de telle sorte que toutes les bobines dans lesquelles le sens du courant est le même

sont assemblées en tension, en série et que les deux séries sont réunies en quantité.

Nous nous occuperons successivement du champ magnétique, de l'anneau mobile et du collecteur : la description actuelle se rapporte seulement aux machines Gramme de laboratoire; les machines industrielles seront ultérieurement étudiées.

Le champ magnétique est produit par les pôles d'un fort aimant recourbé dont les extrémités viennent s'appuyer sur deux patins, deux pièces polaires en fer doux qui sont entaillées de manière à envelopper la bobine mobile. Les aimants sont de forme variable, composés de lames superposées, et spécialement des aimants feuilletés du système Jamin (39).

La bobine tourne dans le plan des aimants, entre les pièces polaires : elle est portée par un axe perpendiculaire à ce plan et auquel on communique un rapide mouvement de rotation. Le plus

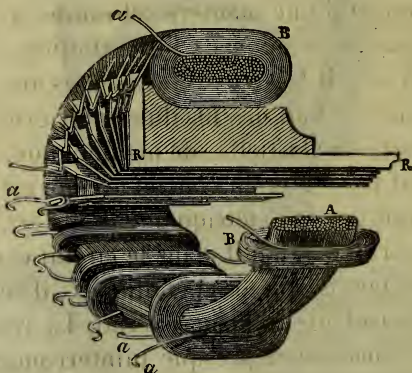


Fig. 253. — Anneau de la machine Gramme. (*La Lumière électrique.*)

souvent ce mouvement est donné par une manivelle adaptée à une roue à engrenage hélicoïde qui engrène avec un pignon d'un petit diamètre.

La bobine est constituée par un fil de fer enroulé de manière à constituer un anneau de section ovalaire A (fig. 253), sur lequel on dispose du fil de cuivre isolé que l'on enroule de manière à former un certain nombre de sections distinctes ayant chacune ses deux extrémités indépendantes *a*, *a*.

Les fils des bobines voisines sont réunis ensemble, d'une part, de manière que ces bobines se fassent suite avec l'enroulement dans le même sens : cette disposition les réunit en *série;* mais en même

temps ces deux fils sont reliés à une lame de cuivre mince R disposée radialement par rapport à l'axe et présentant d'un côté un prolongement d'une faible longueur. Il y a ainsi autant de lames de cuivre que de bobines ; elles sont séparées entre elles par des lames isolantes : les prolongements dont nous venons de parler constituent donc un cylindre présentant alternativement des parties isolantes et des parties conductrices.

Considérons les deux plaques diamétralement opposées qui, à un instant donné, sont sur la ligne de commutation et supposons que, à ce moment, on les mette en contact avec les extrémités d'un fil conducteur. Toutes les bobines qui sont d'un même côté de cette ligne se comportent comme des éléments de pile réunis en tension, et les deux séries ainsi constituées sont réunies en quantité. Il faut donc que l'on puisse établir, à chaque instant, une communication entre les extrémités du circuit extérieur et celles des plaques conductrices qui arrivent sur la ligne de commutation : on y parvient en assurant le contact d'une manière suffisante, à l'aide des *balais* qui sont formés par la réunion de fils métalliques placés parallèlement et pincés à une de leurs extrémités dans une monture métallique à laquelle aboutit l'un des fils du circuit extérieur. Ces balais présentent une certaine élasticité, de manière que, malgré la rotation, ils ne cessent pas d'être en contact avec le cylindre tournant.

Si le contact avait lieu géométriquement suivant une ligne, une génératrice, le courant passerait dans le circuit extérieur, lorsque ces balais toucheraient les pièces métalliques ; il serait interrompu quand une lamelle isolante leur succéderait. La rotation étant très rapide, il y aurait succession presque ininterrompue des effets du courant, mais celui-ci, en réalité, cesserait à certains instants.

Dans la pratique, il n'en est pas ainsi : par suite de leur flexibilité, les balais touchent l'axe tournant, non suivant une génératrice, mais suivant une surface d'une certaine étendue ; on peut considérer qu'il y a *toujours* contact de chaque balai avec une lame conductrice parce que, avant que l'une d'elles ait cessé de toucher les fils métalliques qui constituent le balai, la suivante touche déjà ces fils. Le courant n'est donc pas interrompu, il est continu dans le sens propre du mot ; il n'est pas constant, parce que, outre que le contact ne se fait pas toujours au même point et que par conséquent la force électromotrice n'a pas rigoureusement la même valeur, la résistance change par suite de l'étendue variable des surfaces métalliques en contact. Mais, dans la plupart des cas, il n'est pas nécessaire d'obtenir cette constance absolue et la continuité suffit.

En réalité, pour obtenir le maximum d'effet, comme nous l'avons dit, il ne faut pas placer les balais de manière que les points de contact soient exactement à 90° de la ligne des pôles; mais il faut les déplacer d'un certain angle qui dépend de diverses circonstances et notamment de la vitesse.

La position des balais une fois déterminée, si l'on vient à la modifier, on diminuera l'intensité du courant. Cette remarque a été utilisée dans certaines machines comme moyen de réglage, ainsi que nous le dirons plus tard.

357. Théorie des machines d'induction. — Nous avons donné une théorie sommaire du fonctionnement des machines d'induction en général, et de la machine Clarke en particulier, basée sur l'action exercée par un pôle sur un circuit fermé, une bobine qui se meut dans le voisinage et qui, par suite du mouvement même, se trouve parcourue par un courant. Nous voulons indiquer maintenant comment on peut expliquer le fonctionnement de ces machines en prenant comme point de départ, non le pôle ou les pôles des aimants en présence, mais le champ magnétique tel qu'il est constitué, soit naturellement, soit par suite de l'existence d'un ou plusieurs aimants.

On démontre, et nous n'avons point l'intention de faire cette démonstration, voulant nous en tenir à un résumé rapide, on démontre que lorsqu'un conducteur fermé limitant un espace de surface invariable se meut dans un champ magnétique, il est le siége d'un courant lorsque, par suite d'une circonstance quelconque, le nombre des lignes de force (19) qui le traversent varie, et que l'intensité du courant est d'autant plus grande que cette variation est plus rapide.

Les variations de ce genre dépendent uniquement du mouvement relatif, de telle sorte que nous supposerons que le champ magnétique est immobile et que c'est le circuit qui se déplace.

La variation du nombre de lignes de force qui traversent le circuit dans son mouvement ne se produit pas évidemment si, le champ magnétique étant uniforme, c'est-à-dire les lignes de force étant également espacées, le circuit se meut parallèlement à lui-même. Mais même avec un mouvement parallèle, le courant se produira si le champ magnétique n'est pas uniforme, et c'est ce qui se passe dans le cas de la machine de Clarke ou dans celle de Pixii. Le changement de sens du courant se produit quand la variation du nombre des lignes de force change, c'est-à-dire quand l'augmentation cesse pour être remplacée par une diminution : il est évident que ce changement

doit se manifester en face de chaque pôle, puisque c'est dans le voisinage du pôle que les lignes de force sont le plus serrées.

Dans le cas d'une machine Gramme, les choses se passent différemment : un anneau ne se meut pas parallèlement à lui-même, il change de direction en tournant autour de l'axe de rotation. Aussi, même dans un champ magnétique uniforme, doit-il être le siège d'un courant lorsqu'il se meut, car le nombre de lignes de force qui le traversent varie nécessairement avec la direction du plan. C'est ce qui explique l'expérience de Delezenne (189) relative à l'induction produite par l'action magnétique terrestre.

Si la bobine tourne et si le champ magnétique n'est pas uniforme, la question est plus complexe et l'on ne peut rien dire à l'avance, car il faudrait connaître la disposition des lignes de force par rapport à la trajectoire suivie par la bobine.

Dans la machine Gramme la question est complexe, on le voit, car c'est cette dernière circonstance qui se produit : le champ n'est pas uniforme, par suite de la présence de l'aimant et de l'anneau de fer doux, et chaque spire se déplace en tournant autour d'un axe situé dans son son plan et par suite en changeant à chaque instant de direction. On voit par là en quoi cette machine diffère de la machine de Clarke. Nous aurons par la suite l'occasion de faire souvent allusion à ces indications générales.

TABLEAU VI

ÉLÉMENTS DU MAGNÉTISME TERRESTRE A PARIS. — OBSERVATOIRE DU PARC DE SAINT-MAUR, 30 JANVIER 1883 (MASCART).

Inclinaison	65° 17′
Déclinaison (ouest)	16° 33′
Intensité totale (en dynes)	0,4640
Composante horizontale (Id.)	0,1932

TABLEAU VII

RÉSISTANCE DES MÉTAUX ET ALLIAGES USUELS

les résistances exprimées en ohms se rapportent à un fil de 1m de longueur.

	Diamètre de 1mm.	Section de 1mmq.
	Ohms.	Ohms.
Argent recuit..................	0,019 37	0,015 21
— écroui..................	0,021 03	0,016 52
Cuivre recuit..................	0,020 57	0,016 16
— écroui..................	0,021 04	0,016 53
Platine recuit..................	0,116 6	0,091 6
Fer recuit..................	0,125 1	0,098 3
Mercure liquide..................	1,224 7	0,961 9
Argent allemand..................	0,269 5	0,211 7

TABLEAU VIII

RÉSISTANCE DES MÉTAUX A DIVERSES TEMPÉRATURES

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$$

t étant la température en degrés centigrades (Matthiessen).

	α	β
Métaux très purs..................	+ 0,003 824	+ 0,000 001 26
Mercure..................	+ 0,000 748 5	— 0,000 000 398
Argent allemand..................	+ 0,000 443 3	+ 0,000 000 152
Alliage d'argent et de platine....	+ 0,000 31	»
Alliage d'argent et d'or..........	+ 0,000 699 9	— 0,000 000 062

FIN DU TOME PREMIER

TABLE ALPHABÉTIQUE

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE

TABLE DES MATIÈRES

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

TABLEAUX.

APPLICATIONS DES THÉORIES GÉNÉRALES DU MAGNÉTISME ET DE L'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE I. — DES MESURES MAGNÉTIQUES ET ÉLECTRIQUES

CHAPITRE II. — MESURES MAGNÉTIQUES.

CHAPITRE III. — MESURES ÉLECTRIQUES

CHAPITRE IV. — ÉVALUATION DES GRANDEURS MAGNÉTIQUES ET ÉLECTRIQUES EN UNITÉS ABSOLUES.

CHAPITRE V. — MACHINES ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE VI. — DES PILES.

CHAPITRE VII. — MACHINES D'INDUCTION.

TABLEAUX.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DU TOME PREMIER

Imprimeries réunies, B.

